SCIENCES ET AVENIR
La Recherche
N°900

NEOLOGISHUTTERSTOCK

Gravitation

LA THÉORIE QUI DÉPASSE EINSTEIN

p.30

ÉGYPTE
Assouan, la colline des morts p.80

MÉTÉORITE
Le mystère de l'explosion sibérienne p.52

MÉDECINE
La peau s'imprime sur mesure p.66

FÉVRIER 2022 - N° 900 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ÎLE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 900 - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 900 - FÉVRIER 2022 - LA THÉORIE QUI DÉPASSE EINSTEIN

VOUS AVEZ LE DROIT D'AVOIR AIDÉ VOTRE PETIT-FILS À ÉPARGNER POUR DELHI

Assurance vie

Aidez à constituer un capital pour un proche dès sa naissance*.

LA BANQUE POSTALE

BANQUE ET CITOYENNE

labanquepostale.fr

* Selon les dispositifs fiscaux spécifiques en vigueur liés aux dons de sommes d'argent. Le contenu de cette publicité ne constitue en aucun cas un conseil en investissement. Les montants investis sur des supports en unités de compte ne sont pas garantis mais sont sujets à des fluctuations à la hausse ou à la baisse dépendant en particulier de l'évolution des marchés financiers, d'où un risque de perte en capital. La Banque Postale distribue des contrats d'assurance vie de CNP Assurances, entreprise régie par le Code des assurances. La Banque Postale – S.A. à Directoire et Conseil de Surveillance au capital de 6 585 350 218 €. 115 rue de Sèvres 75275 Paris CEDEX 06. RCS Paris n° 421 100 645. ORIAS n° 07 023 424.
DOCUMENT À CARACTERE PUBLICITAIRE

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

BERNARD MARTINEZ

L'intelligence artificielle face au réel

On ne sait pas représenter l'incertitude. Comment entraîner une machine à… prédire ? Ces phrases résonnent curieusement deux mois après avoir été prononcées à l'Institut de France, lors du colloque intitulé « Mythes et machines » dont l'objectif était de « penser la technologie aujourd'hui ». Car une crise cardiaque soudaine a emporté fin décembre l'académicien des sciences et des technologies Jean-Paul Laumond, à l'origine de cette journée coorganisée avec Daniel Andler, de l'Académie des sciences morales et politiques. Il l'avait animée en arborant son célèbre sourire et nombre de roboticiens se disent aujourd'hui orphelins.

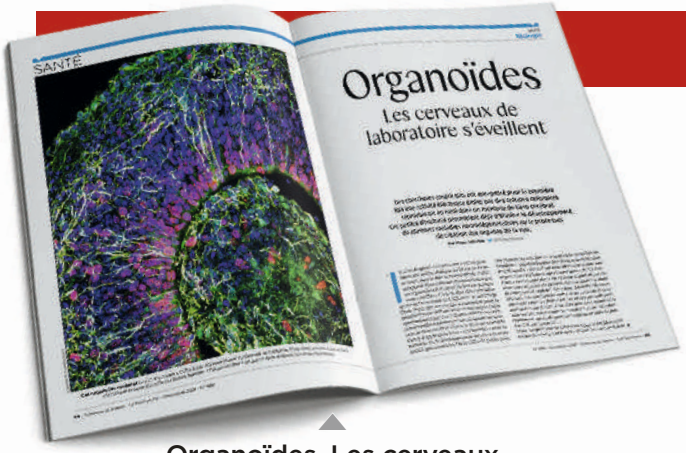
Rêves de machines achevées. En hommage au scientifique internationalement admiré, on rappellera simplement le titre de sa propre intervention : « Robotique : l'intelligence artificielle face au réel ». Jean-Paul Laumond voulait absolument signifier que *« les mythes nous présentent des rêves de machines achevées »*. Qu'il s'agisse des chaises roulantes et des servantes en or venant en aide au dieu boiteux Héphaïstos ou du Golem du Maharal de Prague.

Ni automate, ni ordinateur. En clair, il faisait une mise en garde. Prière de faire la part entre l'imagination des écrivains ou cinéastes et « le réel qui s'impose » à ceux qui ont décidé de construire des robots humanoïdes ou des drones. Ils en font l'expérience, au point d'avoir dû développer pour leurs machines une intelligence… de la gravité ! Si un bébé, dès 8 ou 9 mois, a bien compris le problème, le robot a besoin de mathématiques sérieusement ajustées quand il se retrouve sur le terrain. Lors de sa leçon inaugurale au Collège de France, il y a dix ans, Jean-Paul Laumond posait la question de son degré d'autonomie. Il insistait sur le fait que le robot *« se distingue à la fois de l'automate, dont les mouvements sont mécaniquement déterminés, et de l'ordinateur, qui manipule des informations mais ne bouge pas »*.

Modèle du monde. On pourra utilement se rappeler qu'on ne sait toujours pas comment apprendre un « modèle du monde » aux machines. Or, pour prendre nombre de décisions et les exécuter, mieux vaut avoir une idée d'un vaste contexte. Ce qui peut donner le vertige, si on élargit le propos. Les fidèles auditeurs des forums de *Sciences et Avenir* se souviendront ainsi de la fameuse histoire que l'astrophysicien Hubert Reeves a contribué à faire connaître, et qui a donné lieu au documentaire *Guerre froide : l'Homme qui sauva le monde*.

Au cœur ou hors champ. Retour en 1983. Stanislav Petrov, au quartier général de l'Union soviétique, a décidé de ne pas réagir alors qu'il avait reçu un message disant que les États-Unis avaient lancé des missiles nucléaires. Qu'auraient fait des drones, postés en des endroits stratégiques, sans intervention humaine ? L'humain, dans les situations critiques, doit-il rester au cœur des circuits de la décision, en supervision générale ou carrément hors champ ? La question a de l'avenir. ■ @dominiqueleglu

COURRIER


SANTÉ

Organoïdes

Les cerveaux de laboratoire s'éveillent

Organoïdes. Les cerveaux de laboratoire s'éveillent
(*Sciences et Avenir - La Recherche*, n° 898, décembre 2021)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Dans le numéro de décembre une série d'articles *(p. 65-69)* traitent de la formation d'organoïdes comme des micro-cerveaux ou des embryons de foie ou de muscles, ayant déjà certaines capacités fonctionnelles, et ce à partir de cellules souches indifférenciées ! Quelle est la « recette » pour induire des cellules à se différencier en neurone plutôt qu'en globule rouge ou en orteil ? Un physicien qui aimerait comprendre quelque chose à la vie !

Bernard Terreault

S. et A. : Le type d'organoïdes (rein, cerveau, intestins…) obtenus à partir de cellules souches au départ indifférenciées est déterminé par les facteurs de croissance et de différenciation diffusés dans leur milieu de culture. Il existe une grande diversité de ces molécules qui sont autant d'ingrédients permettant de favoriser tel ou tel type cellulaire ou, au contraire, d'inhiber tel ou tel autre. Pour obtenir un organoïde de cerveau par exemple, il faudra au moins des polypeptides NGF (facteur de croissance nerveuse) et des FGF (facteur de croissance des fibroblastes). Mais des dizaines de protéines différentes peuvent favoriser la différenciation en cellules de peau, de rein, de cœur… Pour chaque type cellulaire voulu, il s'agit d'élaborer le bon cocktail !

Volcans

Lorsque l'on voit des volcans comme celui de Cumbre Vieja sur l'île de La Palma aux Canaries (Espagne) qui « crache » depuis des semaines consécutives des milliers de mètres cubes de lave et de cendres, je me demande par quoi est remplacée toute cette matière dans notre sous-sol ? Il devrait s'effondrer quelque part ?

Jacques Souben

S. et A. : L'éruption du volcan Cumbre Vieja, comme toutes les grosses éruptions, provoque en effet un « vide » de matière à l'intérieur du volcan, et peut donc causer un affaissement de terrain. Cependant, avant une éruption, il y a ce qu'on appelle une « inflation », la terre se « lève » et gonfle car du magma s'est accumulé. C'est ensuite ce gonflement qui provoque une surpression dans la chambre magmatique, puis une éruption. Dans le cas d'un affaissement provoqué par une éruption volcanique, des glissements de terrain peuvent se produire, et aller jusqu'à l'effondrement du volcan : c'est la formation d'une caldeira. Mais pour le volcan Cumbre Vieja, ce scénario n'est pas envisagé : si l'éruption dure, c'est que la chambre magmatique se renouvelle à cause de remontées de magma. Celles-ci viennent des profondeurs, où le peu de volume qui s'échappe ne suffit pas à causer de différence significative.

CATERS/SIPA

L'éruption du Cumbre Vieja, aux Canaries, en décembre 2021.

Omicron contagieux

L'actualité sur le Covid-19 m'amène à vous poser cette question à laquelle je ne trouve pas de réponses satisfaisantes. Il est écrit partout que le variant Omicron est plus contagieux que les précédents. Qu'est-ce qui détermine la contagiosité d'un virus ?

Pierre Leblanc

S. et A. : La plus haute contagiosité d'Omicron s'explique en grande partie par sa capacité à échapper à l'immunité acquise, c'est-à-dire que les personnes précédemment infectées ou vaccinées ne sont pas aussi bien protégées contre ce variant que contre Delta, ce qui augmente le nombre de personnes qu'Omicron peut infecter. Aussi, il semble devenir contagieux bien avant la survenue des symptômes, facilitant sa transmission.

Vitesse de rotation

Dans votre numéro de novembre 2021, à la page 14, je lis dans le petit article « SOS étoile en détresse » : *« tournant sur lui-même à 80 % de la vitesse de la lumière… »* Il s'agit, je pense, d'une rotation propre, qui s'exprime donc en tour par seconde ou radian par seconde. Je ne vois pas comment une vitesse de rotation peut être comparée à la vitesse de la lumière qui, elle, est une vitesse de translation, s'exprimant en km/s. Peut-être voulez-vous dire que cette étoile, sphérique ou ellipsoïdale, a une vitesse de rotation telle qu'un point de son équateur possède une vitesse de déplacement égale à 80 % de c (célérité des ondes électromagnétiques).

Serge Laroze

S. et A. : Vous répondez vous-même à votre question, et de fort belle manière. Nous ne saurions quoi ajouter, si ce n'est que les précisions que vous apportez ne tenaient pas dans l'espace d'une brève !

Précision

Huiles. Dans l'encadré de l'article « Toutes les saveurs des huiles » (S. et A. n° 896, p. 73), il fallait lire : « L'huile de colza a toute sa place en cuisine car elle répond aux besoins d'acides gras polyinsaturés de type d'acide linolénique (ALA) » et non linoléique.

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Toujours voir au-delà

Les lecteurs réguliers de *Sciences et Avenir – La Recherche* le connaissent sur le bout des doigts, les premiers acheteurs — bienvenue à eux ! — le découvrent peut-être. Voici le portrait de l'Univers tel qu'on l'enseigne aujourd'hui. Le mouvement de tous les astres peut être décrit par l'action d'une seule force, la gravitation. Établie par Isaac Newton au XVII^e^ siècle, transcendée par Albert Einstein au début du XX^e^ siècle, la loi de la gravitation permet de décrire tout l'Univers. À une « petite » entorse près. Ce que l'on peut en voir ne compte que pour 5 % du contenu du cosmos. Le reste ? Pour 26 %, une énigmatique « matière noire » dont on ne sait à peu près rien, et, enfin, une non moins mystérieuse « énergie noire ». La première permet d'expliquer pourquoi étoiles et galaxies se déplacent plus vite que ne le prédisent les calculs. La seconde pourquoi l'expansion de l'Univers s'accélère. Avec elles, tout s'explique. Mais *« toutes ces inconnues, cela devient franchement inélégant »*, nous confie Gabriel Chardin, l'un des pionniers français de la recherche de la matière noire *(p. 37)*. Aussi, une fois ce portrait dressé, ne reste-t-il que deux possibilités : imaginer toutes les expériences possibles pour mettre la main sur ce mystérieux « Univers noir » (*lire* S. et A. *n° 865)*, ou laisser leur chance à des théories alternatives. Des résultats récents ont ainsi redonné de la vigueur à la théorie MOND, proposée il y a près de quarante ans. Une modification des équations qui nous emmène sur les terrains inexplorés de l'antimatière et de l'antigravité. Mais ce n'est pas le seul voyage auquel nous vous convions ce mois-ci. *Sciences et Avenir – La Recherche* est le seul mensuel scientifique francophone à envoyer ses journalistes sur des terrains parfois lointains. En Égypte, explorer une extraordinaire nécropole exploitée durant mille ans. En Sibérie, pour comprendre la plus grande explosion de météorite survenue de mémoire d'humain, en 1908. En Suisse, où pour la première fois, des médecins parviennent à fabriquer de la peau sur mesure pour sauver les grands brûlés. Pour ce n° 900, toute la rédaction s'est une nouvelle fois mobilisée pour faire honneur à cette passion des découvertes scientifiques que nous partageons depuis 1947. Merci pour votre fidélité. ■ @mathieu_nowak

> « Une modification des équations qui nous emmène sur les terrains inexplorés de l'antimatière et de l'antigravité »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Directrice de la rédaction Carole CHATELAIN - 01.55.35.56.57
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Rédacteurs en chef Mathieu NOWAK (mensuel) - 01.55.35.56.38
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la direction de la rédaction
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (actualités, médecine) - 01.55.35.56.52
Rédaction Bernadette ARNAUD (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44 - Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro Pierre BERLOQUIN, Nicolas GUTIERREZ C., Pierre KALDY, Léa FOURNASSON, Arthur LANGLOIS, Estelle LEVRESSE, Nicolas MAHAUT, Anouk TOMAS
Secrétaire de rédaction
Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23 - Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24 - Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15 - Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49 - Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Directeur général Philippe MENAT
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Christophe PERRUSSON
Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur délégué Philippe LÉONARD - 01.44.88.89.18
Directeur de publicité Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. - Tél. : 01.55.35.56.00

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,014 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « Le Carré de soie » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés ; ainsi qu'un message « Challenges» jeté sur couverture en diffusion partielle des abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

MUSÉUM
NAL HIST
NATURELLE

PORTONS LA VOIX DE LA NATURE

Partagez notre engagement !

Plus d'informations sur **mnhn.fr**

Écoutez ***Pour que nature vive,*** des podcasts incarnés par des chercheuses et chercheurs pour **comprendre le vivant.**

18 épisodes en ligne sur le site du Muséum et sur les plateformes d'écoute.

Lisez les ***Manifestes du Muséum,*** une collection d'ouvrages qui offrent un **éclairage scientifique** sur des **sujets d'actualité.**

5 ouvrages disponibles en librairie.

Contribuez aux ***Sciences participatives*** et récoltez des données liées aux **enjeux environnementaux.**

Programmes sur le site du Muséum et sur **vigienature.fr**

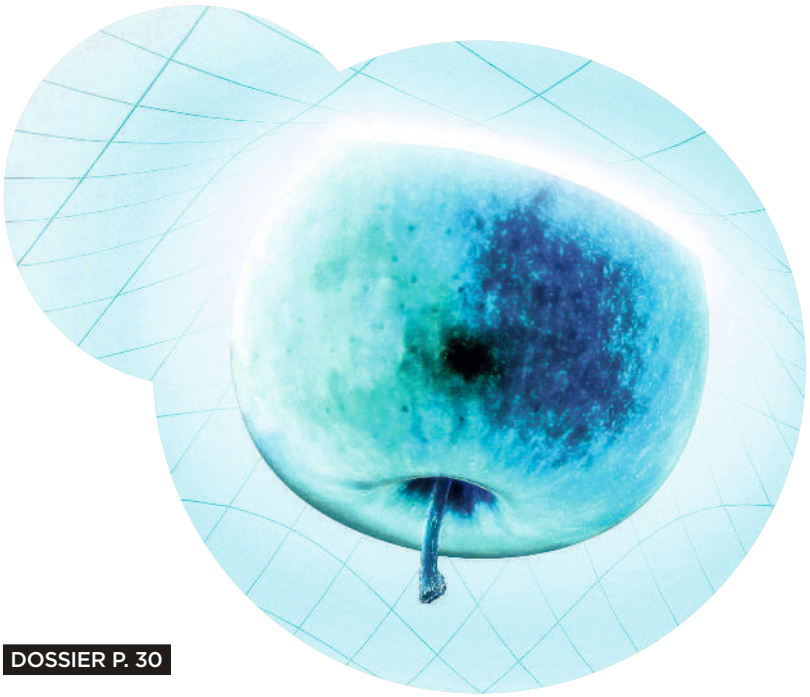
Participez aux ***Tribunes du Muséum,*** le rendez-vous qui remet **la science** au cœur du **débat politique et social.**

2 rencontres par an, captations vidéos sur le site du Muséum et sur Youtube.

© MNHN

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 900 / Février 2022



DOSSIER P. 30

Gravitation

À la recherche de la théorie ultime

Élaborée par Newton puis prolongée par Einstein, la loi de la gravitation, qui décrit l'Univers, ne peut résoudre certains paradoxes. Les cosmologistes tentent de nouvelles équations et expériences pour décrire plus justement la dynamique des astres.

P. 52

Toungouska, sur les traces de l'astéroïde mystère

L'immense explosion survenue en 1908 en Sibérie demeure une énigme scientifique. Un chercheur russe avance l'hypothèse d'un astéroïde de fer ayant traversé l'atmosphère.

P. 62

Ménopause : retarder l'échéance pour mieux vieillir

Les transplants de tissu ovarien pourraient devenir une approche courante pour effacer les troubles liés à la ménopause et réduire l'incidence de certaines maladies.

P. 80

Égypte : la colline des morts dévoile ses secrets

Utilisée pendant presque mille ans, la nécropole d'Assouan, au sud de l'Égypte, dernière demeure de différents peuples, est une mine d'or pour les archéologues.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu
4 **Courrier**
5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** On a touché le Soleil ! / Ces « robots vivants » se reproduisent
44 **Ces ondes qui font léviter les objets**
48 **Vieillir le vin sous l'eau pour le bonifier**
50 **Entretien avec Xavier Pasco,** directeur de la Fondation pour la recherche stratégique

NATURE

14 **ACTUALITÉS** La stupéfiante régénération des forêts tropicales / Les abeilles aussi se protègent par la distanciation sociale
52 **Toungouska, sur les traces du mystérieux astéroïde**
58 **Le tardigrade, cet as de la survie**
61 **Quand un bateau sombre, la vie prolifère**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** Il y aurait trois maladies d'Alzheimer / On connaît l'origine de la migraine
62 **Ménopause : retarder l'échéance pour mieux vieillir**
66 **Cette machine produit de la peau sur mesure**
69 **Pourquoi notre cerveau est si énergivore**
70 **Les psychédéliques au chevet des troubles mentaux**
74 **Nutrition : le retour en force du café**
76 **Dossier spécial : mieux gérer le stress**

HISTOIRE

26 **ACTUALITÉS** La crucifixion était pratiquée dans le nord de l'Europe / Un embryon de dinosaure parfaitement fossilisé
80 **Égypte : la colline des morts dévoile ses secrets**
86 **L'épave de la « Mary-Rose » va-t-elle sombrer à nouveau ?**

TRANSVERSALES

88 **Sélection livres**
92 **Expositions**
93 **Le ciel de février**
94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Maths par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar
96 **Questions de lecteurs**
97 **Solutions des jeux**
98 **Jeux**

GARLICK/SPL/SUCRÉ SALÉ - CLAUS LUNAU/ SPL/ SUCRÉ SALÉ - GETTY IMAGES - EIMAWA / UNIVERSITÉ DE MILAN

En pénétrant la haute atmosphère du Soleil, la sonde américaine a effectué des mesures qui vont permettre notamment de mieux comprendre l'origine des vents solaires (vue d'artiste).

NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/JOY NG

On a touché le Soleil !

Lancée en 2018, la sonde Parker Solar a officiellement pénétré la couronne solaire durant quelques heures. C'est la première fois qu'une étoile, notre Soleil, est approchée de si près.

La sonde Parker Solar Probe a réalisé le rêve d'Icare de toucher le Soleil. Mais contrairement au personnage du mythe, elle n'y a pas perdu ses ailes. Non seulement elle a survécu, mais elle a transmis vers la Terre des données qui attestent de son passage dans la couronne solaire. Rigoureusement parlant, la sonde de la Nasa n'a pas touché la surface du Soleil… qui est une boule de gaz. *« Par convention, on définit la surface comme étant la couche émettrice de lumière visible, la photosphère »*, explique Léa Griton, chercheuse au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (Lésia, observatoire de Paris). Parker s'en est approchée à seulement 13 millions de kilomètres. Suffisamment pour acter la toute première incursion dans l'atmosphère d'une étoile, la couronne solaire en l'occurrence.

Une température de 2 millions de degrés

« Elle se compose d'un mélange de protons, d'ions positifs et d'électrons à haute température, c'est-à-dire du plasma. Parker Solar s'est suffisamment enfoncée pour parvenir à une zone où les mouvements du plasma sont dominés par le champ magnétique du Soleil », s'enthousiasme Léa Griton. Température lors de la visite : 2 millions de degrés ! La sonde possède certes un bouclier thermique très efficace, mais c'est pour une autre raison qu'elle n'a pas fondu : *« La température mesure la vitesse de déplacement des particules, tandis que la chaleur correspond à la quantité totale d'énergie qu'elles transfèrent. Dans la couronne, les particules peuvent se déplacer très rapidement, ce qui conduit à une température très élevée. Mais elles sont très peu nombreuses — quelques milliers par cm^2 — et ne transfèrent donc pas beaucoup d'énergie. Cette "température" n'a pas le même impact que sur Terre. »*

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Au-delà de l'exploit, les mesures effectuées et qui doivent maintenant être analysées permettront de mieux comprendre l'origine des vents solaires, flux d'ions et d'électrons arrachés à la couronne, dont les plus violents produisent sur Terre des tempêtes magnétiques capables d'endommager l'électronique des satellites et des installations au sol. *« Il existe plusieurs scénarios pour expliquer le phénomène ; les observations de Parker Solar, couplées à celles de Solar Orbiter* [lancée en 2020], *nous permettront de trancher »*, prédit Léa Griton. ■ **F. N.**

Le télescope du siècle lancé avec succès

ASTRONOMIE Le télescope spatial James-Webb s'est envolé le 25 décembre depuis Kourou en Guyane *(lire* S. et A. *n° 898 et p. 95)*. Le lancement réussi par la fusée Ariane 5 lui a fait économiser de précieuses quantités de carburant. Il devrait ainsi pouvoir fonctionner pendant plus de dix ans. Le successeur de Hubble devrait s'installer le 23 janvier au point de Lagrange L2 à 1,5 million de kilomètres de la Terre, d'où il observera l'éclat des premières étoiles ou la composition des exoplanètes. **F. D.**

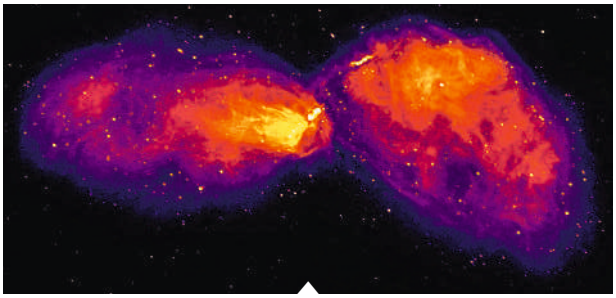
ESA

Le James-Webb devrait pouvoir fonctionner plus de dix ans.

La plus grande éruption de trou noir jamais capturée

Des astronomes sont parvenus à saisir l'image la plus complète de l'émission radio d'un trou noir supermassif, situé à 12 millions d'années-lumière de la Terre.

Cette trace fantomatique est estimée, en surface, à 16 pleines Lunes placées côte à côte sur la voûte céleste. C'est l'image la plus complète de l'émission radio d'un des trous noirs supermassifs les plus proches de la Terre que des astronomes sont parvenus à capter grâce au télescope Murchison Widefield Array (MWA), situé en Australie. Il s'agit du trou noir présent au centre de la galaxie Centaurus A, à environ 12 millions d'années-lumière de la Terre et dont la masse est estimée à 55 millions de masses solaires, contre seulement 4,3 millions pour Sagittarius A* au cœur de la Voie lactée. Lorsque ce monstrueux trou noir se nourrit de gaz, de poussière et d'autres matériaux, il en expulse une partie sous forme de jets à une vitesse proche de celle de la lumière. Ces jets peuvent alors s'observer sous la forme de gigantesques « lobes » de plasma s'étendant à plus d'un million d'années-lumière du centre de Centaurus A. **M. B.**



B. MCKINLEY, ICRAR/CURTIN AND CONNOR MATHERNE, LOUISIANA STATE UNIVERSITY

Les lobes de plasma s'étendent à plus d'un million d'années-lumière du centre de la galaxie Centaurus A.

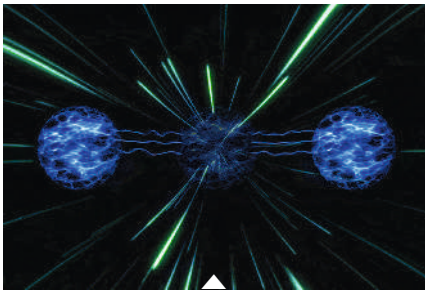
EN DEUX MOTS

ASTÉROÏDE Un troisième satellite a été détecté autour d'Électre, faisant de ce corps rocheux gravitant entre Mars et Jupiter le premier astéroïde quadruple. **COLLISION** La Chine s'est plainte au Bureau des affaires spatiales de l'ONU d'avoir dû manœuvrer sa station spatiale par deux fois pour éviter une rencontre avec des engins de SpaceX, la société d'Elon Musk. **INFORMATIQUE** Les ministres français des Armées, de la Recherche et du Numérique ont officiellement lancé la plateforme nationale de calcul quantique.

Les photons pourraient se scinder en deux

PHYSIQUE Selon des physiciens, les photons qui constituent la lumière pourraient être scindés en deux pour obtenir des particules identiques jamais observées jusqu'à présent : des bosons de Majorana, menant à une nouvelle phase de la lumière. Encore théorique, le système qu'ils proposent constituerait un changement de paradigme majeur dans la façon dont nous comprenons la lumière. **L. F.**

SOURCE : VINCENT P. FLYNN, DARTMOUTH COLLEGE, ÉTATS-UNIS.



LADARIUS DENNISON

La division d'un photon en deux (vue d'artiste) modifierait notre conception de la lumière.

IDÉE NOUVELLE

L'eau sur Terre portée par les vents solaires

GÉOSCIENCES Une partie de l'eau présente sur Terre pourrait être due aux vents solaires. En se déposant sous forme de grains de poussière sur des astéroïdes se dirigeant vers la Terre, les protons contenus dans ces vents auraient déclenché une réaction chimique produisant de l'eau à leur surface, qui aurait ensuite été apportée à notre planète lorsque les astéroïdes l'auraient percutée. **L. F.**

SOURCE : LUKE DALY, UNIVERSITÉ DE GLASGOW, ROYAUME-UNI.

NASA

Les échantillons sont composés de matériaux primitifs.

L'astéroïde Ryugu commence à livrer son histoire

GÉOCHIMIE Les premières analyses des échantillons de Ryugu prélevés en 2019 par la sonde japonaise Hayabusa 2 montrent que l'astéroïde est composé de matériaux primitifs remontant à la formation du Système solaire, il y a 4,5 milliards d'années. Ces roches très sombres ne réfléchissent que 2 à 3 % de la lumière. Elles sont constituées d'une matrice hydratée et de molécules organiques qui vont faire l'objet d'examens approfondis. **F. D.**

SOURCE : C. PILORGET, INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE, ORSAY, FRANCE.

L'exoplanète qui ne devrait pas exister

ASTRONOMIE Des chercheurs ont observé pour la première fois une exoplanète en orbite autour d'un système binaire d'étoiles massives, pesant entre 6 et 10 masses solaires. Soit au moins deux fois le maximum supposé possible : en effet, en principe, les étoiles plus massives tendent à engloutir la matière de leur disque protoplanétaire à partir duquel se forment les planètes. **L. F.**

SOURCE : MARKUS JANSON, UNIVERSITÉ DE STOCKHOLM, SUÈDE.

144

Le record de lancements de fusées tentés sur une année

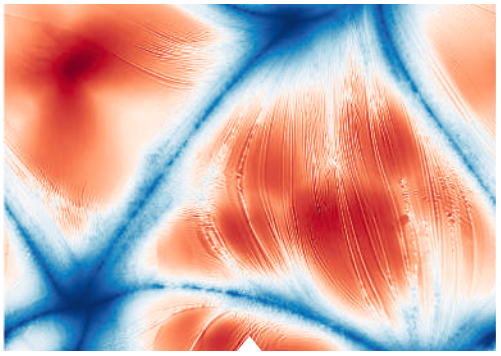
ESPACE Jamais autant de lancements de fusées n'avaient été tentés dans l'histoire qu'en 2021. Sur les 144 essais, soit un tous les deux jours et demi en moyenne, 133 ont réussi. Le précédent record avait été établi en… 1967 avec 122 décollages réussis sur 139 tentatives. Entre 2000 et 2010, seulement 70 par an étaient tentés en moyenne. **H. J.**

SOURCE : SPACE LAUNCH REPORT.

De la convection thermique sur Pluton !

PLANÉTOLOGIE La glace d'azote, qui couvre sur Pluton le bassin Sputnik Planitia, bouge sous l'effet d'une convection thermique malgré le faible rayonnement qui parvient à 4,5 milliards de km du soleil. Une étude vient d'en expliquer le mécanisme : la glace se sublime sous l'effet du Soleil, ce qui se traduit par un refroidissement local engendrant des mouvements de la couche de glace à l'échelle de 100 000 ans, comparables à celui des plaques tectoniques sur Terre. **F. N.**

SOURCE : A. MORISON, UNIVERSITÉ D'EXETER, ROYAUME-UNI.



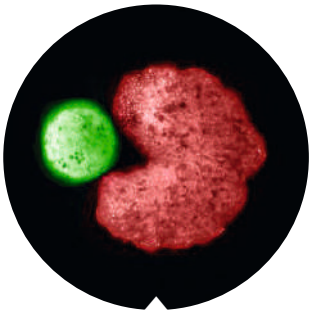
A. MORISON/S. LABROSSE/G. CHOBLET

Les anomalies de température sous la surface de la glace de Pluton telles que prédites par un modèle numérique.

Ces « robots vivants » sont capables de se reproduire

Conçus par un algorithme à partir de cellules souches, les xénobots peuvent se déplacer et même s'autorépliquer.

Créés à l'aide d'un algorithme évolutif puis modelés en laboratoire, les tout premiers « robots vivants » faits à partir de cellules souches avaient été présentés en 2020 par une équipe américaine. Ces « xénobots », du nom de la grenouille *Xenopus laevis* dont ils sont issus, s'étaient montrés capables de se déplacer, d'adopter un comportement collectif, de s'autoréparer ou encore de manipuler un objet. Les chercheurs leur ont découvert une nouvelle propriété : ils peuvent se reproduire ! Ils ont en effet constaté que les cellules souches de la grenouille africaine à griffes se livraient à une forme unique d'autoréplication induite par le mouvement. Jamais une telle capacité n'avait été observée chez les cellules d'un autre animal ou d'un végétal. Si les scientifiques assurent avoir conscience que cette biotechnologie peut être « *inquiétante* », ils précisent qu'elle pourrait d'abord être développée « *pour effectuer des tâches utiles, comme la réparation de circuits électriques* », avant d'intégrer des organismes d'êtres vivants, en vue, par exemple, d'éviter des interventions chirurgicales. **M. B.**



DOUGLAS BLACKISTON, SAM KRIEGMAN

En poussant des cellules dissociées, le xénobot (en rouge) se réplique (en vert).

PRENDRE SOIN DE VOUS, C'EST NOTRE METIER

CHAÎNE THERMALE DU SOLEIL

agit naturellement pour votre santé

- 1er **choix de destinations** avec 20 stations thermales dans des cadres naturels exceptionnels.
- 1er **choix de cures** : Rhumatologie, Phlébologie, Voies Respiratoires, Appareil Digestif, Dermatologie…
- 1er **éventail de soins exclusifs**, mis au point en concertation avec les Centres Hospitaliers Universitaires, le Corps Médical et les équipes thermales.
- 1ère **équipe d'experts en médecine et soins thermaux**, complétée d'éducateurs sportifs, diététiciens, psychologues et sophrologues, en relation avec 52 associations de patients.
- 1er **choix de cures spécifiques** : Lombalgie, fibromyalgie, gonarthrose, acouphènes, troubles du sommeil, suite de cancer du sein…
- 1er **suivi médical de post-cure** à 3, 6 et 9 mois.
- 1er **choix d'hébergements** réservables en une fois avec votre cure.
- 1er **choix de cures pour les actifs** : mini-cures de 6 jours et cures nocturnes.
- 1er **choix des curistes** : 190 000 curistes nous ont fait confiance en 2019.

COVID-19 Charte sanitaire station thermale

TROUVEZ VOTRE CENTRE DE CURE chainethermale.fr

Documentation & renseignements gratuits

01 88 32 86 36

Je désire recevoir gratuitement le guide 2022 des cures de la Chaîne Thermale du Soleil :

Par courrier en envoyant ce coupon à :
Chaîne Thermale du Soleil - Centrale de réservation Flandres - 1283 route Fontaine Bouillon - 59230 Saint-Amand-les-Eaux

OU

en Flashant le QR CODE ci-dessous

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

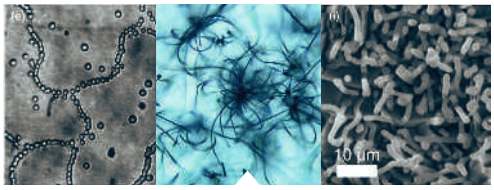
Ville : ..... Code postal : .....

Téléphone : ..... Email : .....

Les données collectées sur ce coupon font l'objet d'un traitement au sens de la loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978 modifiée et du RGPD. Vos données seront conservées 3 ans afin de mieux communiquer avec vous et vous proposer des produits ou services analogues. Vous disposez, à tout moment, d'un droit d'accès, de rectification, de limitation, d'effacement et de portabilité de vos données, du droit de définir des directives relatives au sort de ces données après votre décès, d'un droit d'opposition et du droit de retirer votre consentement à tout moment. Vous pouvez exercer vos droits par voie postale à l'adresse suivante : CHAINE THERMALE DU SOLEIL, Service de traitement des données à caractère personnel, 31 avenue de l'Opéra, 75002 PARIS ou par email à : dpo@chainethermale.fr. Vous disposez également du droit d'introduire une réclamation auprès de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.

SA0222

Agence MEESTERS - Crédit photo : Mariela Niels



UNIVERSITY OF EDINBURGH

Ces structures composites issues de réactions chimiques ressemblent à des micro-organismes fossiles.

Ceci n'est pas un fossile

ASTROBIOLOGIE Les rovers arpentant Mars en quête d'anciennes traces de vie pourraient un jour tomber sur de fausses « biosignatures », avertissent des géoscientifiques. Ils ont listé les processus abiotiques (sans présence de vie) susceptibles de former de faux fossiles aux attributs chimiques, minéralogiques ou texturaux similaires à un vrai. **L. F.**

SOURCE : SEAN MCMAHON, UNIVERSITÉ D'ÉDIMBOURG, ROYAUME-UNI.

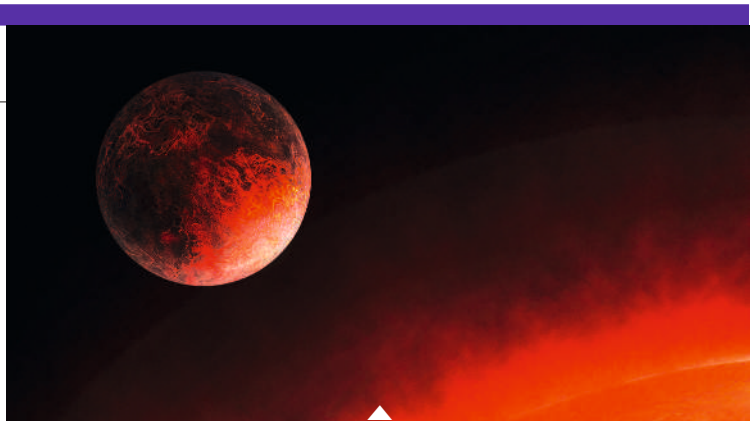
LENTINK LAB

Le robot reste en position sur une branche pour économiser sa batterie.

Des serres de faucon pèlerin sous un drone

BIOMIMÉTISME Des chercheurs se sont inspirés des rapaces pour doter leur drone de deux pattes en forme de serres lui permettant d'agripper des branches. Elles utilisent des ressorts et de la fibre synthétique pour imiter l'action des muscles et des tendons afin d'atterrir en douceur et se poser pour économiser la batterie plutôt que de rester en vol stationnaire. **A. D.**

SOURCE : WILLIAM R. T. RODERICK, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.



SPP 1992, PATRICIA KLEIN

Proche de son étoile, l'exoplanète a une température de 1300 °C en surface.

Découverte d'une planète de fer

Cette exoplanète posséderait un cœur de fer représentant environ les quatre cinquièmes de son rayon.

Petite mais costaud : l'exoplanète GJ 367b, à peine plus grande que Mars, aurait un cœur de fer représentant environ les quatre cinquièmes de son rayon. Elle a été découverte à 31 années-lumière de la Terre grâce aux données fournies par le satellite TESS et l'instrument HARPS, au Chili. *« Cette mesure à la limite des capacités des instruments a été possible grâce à la très courte période orbitale, huit heures, de GJ 367b,* explique Xavier Bonfils, de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble. *TESS observe une cible durant 27 jours. La planète a ainsi fait un grand nombre de passages devant son étoile, ce qui a permis de multiplier les observations et d'affiner la précision.* » En plus de son « gros » cœur, elle posséderait selon les modèles une couche de glace, un maigre manteau en silicates et peut-être une fine atmosphère d'hydrogène et d'hélium. Ce qui la fait ressembler à Mercure, dotée également d'un cœur de fer disproportionné. C'est aussi un enfer : située à seulement un million de kilomètres de son étoile, sa température en surface est de l'ordre de 1300 °C. **F. N.**

IL A DIT

« La Terre est en voie d'acquérir ses propres anneaux comme ceux de Saturne. À ceci près qu'ils seront faits de débris spatiaux »

Jake Abbott, professeur de robotique à l'université d'Utah (États-Unis), à propos de la pollution galopante des orbites de la Terre contre laquelle son équipe développe des bras robots à aimants pouvant capter les débris spatiaux.

ENGINEERED ARTS DESIGNED

À VOIR SUR LE NET

Ameca, le robot à visage humain parfait

ROBOTIQUE La société britannique Engineered Arts, spécialisée en robotique, a dévoilé au salon CES 2022 de Las Vegas un robot humanoïde, Ameca, capable d'adopter des expressions faciales et des postures d'un réalisme confondant. Si l'humanoïde est plus vrai que nature, il n'interagit pas : ses attitudes sont préprogrammées à partir d'un logiciel conçu par la société. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

RIVAGES
DU MONDE

Prendre le large, c'est essentiel.

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – Crédit Dreamstime

Croisières

EXPÉDITIONS

NORVÈGE • ARCTIQUE • ISLANDE • GROENLAND • SPITZBERG

A bord d'un véritable yacht d'expédition, conçu pour 180 passagers.
Un navire à propulsion hybride, pouvant stationner sans jeter l'ancre, pour une meilleure protection des sanctuaires marins. Des conférenciers spécialistes des régions polaires présents à bord.

SA01

Voguer. Échanger. Rêver

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

FORESTRY AND CLIMATE CHANGE FUND/FCCF

Sans intervention, ces forêts secondaires retrouvent 80 % de leur biodiversité en 20 ans (ici au Costa Rica).

La stupéfiante régénération des forêts tropicales

Selon une étude, la fertilité des sols se reconstitue en dix ans seulement après l'abandon des cultures.

Quand les agriculteurs abandonnent des sols épuisés par leur exploitation, la nature les recolonise à une vitesse qui a stupéfié les 80 chercheurs travaillant sur les écosystèmes forestiers en Amérique latine et en Afrique. Selon leur article paru dans *Science*, la fertilité des sols se reconstitue en dix ans seulement après l'abandon des cultures. Le fonctionnement naturel de la forêt se rétablit, lui, en vingt à trente ans, la composition en espèces végétales en cinquante ans et la biomasse (la masse de végétaux que comprend une forêt vierge) en cent ans. « *Sans aucune intervention humaine et dans de bonnes conditions, la forêt peut retrouver son fonctionnement avec un retour de 80 % de la biodiversité antérieure en vingt ans* », assure Bruno Hérault qui a participé à ces travaux.

Laisser faire la nature plutôt que de replanter

Le chercheur du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) travaille, lui, en Côte d'Ivoire sur les terres qui ont supporté la culture intensive du cacaoyer. Cet arbre des sous-bois voit sa productivité augmenter en plein soleil, si bien que les grands arbres alentour ont tous été coupés depuis les années 1970, entraînant l'épuisement des sols et l'abandon des cultures. Les chercheurs ont ainsi pu observer de près la reconquête de la forêt grâce aux témoignages des agriculteurs, confortés par l'imagerie satellite. La même méthode a été appliquée en Amérique latine et dans d'autres régions d'Afrique avec des résultats similaires. Selon l'article de *Science*, les forêts secondaires repoussant naturellement représentent 8 millions de km². Ce résultat spectaculaire amène les chercheurs à émettre une recommandation : « *On parle beaucoup de reforestation à partir de programmes de plantation d'arbres,* note Bruno Hérault. *Mais il faudrait laisser une grande part à ces régénérations naturelles qui coûtent beaucoup moins cher et sont très efficaces dans un laps de temps court.* » ■ **L. C.**

IL A DIT

« Le réchauffement climatique a un réel impact sur les clémentiniers en Corse »

Olivier Pailly, directeur de l'unité de recherche Inrae sur les agrumes, dont les travaux révèlent une diminution de l'acidité des clémentines corses et une augmentation de leur teneur en sucre.

Les coraux stockent du plastique

POLLUTION Des chercheurs ont exposé quatre espèces de coraux à des microplastiques de polyéthylène : après 18 mois de ce régime, les particules ont été retrouvées en plus grand nombre dans le squelette des spécimens plutôt que dans leurs tissus : jusqu'à 84 particules par cm^3 contre 2 par cm^2. En tout, quelque 20 000 t de microplastiques seraient ainsi ingérées chaque année par les coraux. **S. R.**

SOURCE : JESSICA REICHERT, UNIVERSITÉ DE GIESSEN, ALLEMAGNE.

JESSICA REICHERT

Les particules de plastique (en noir) sont piégées dans le squelette des coraux.

EUROPE MATIN 6H30-9H
DIMITRI PAVLENKO
Écouter
L'INTERNATIONAL,
LA SOCIÉTÉ, LA CULTURE,
L'ÉCONOMIE, LA POLITIQUE,
LES ENJEUX D'AUJOURD'HUI
ET DE DEMAIN.
LE POUVOIR DE L'ÉCOUTE
Europe 1
FLASHEZ POUR ÉCOUTER
EN PODCAST
CapaPictures / Europe 1

Les abeilles aussi se protègent par la distanciation sociale

Pour faire face à la menace de parasites, la ruche se réorganise en vue de limiter les interactions.

Les abeilles européennes (*Apis mellifera*), aux colonies très compartimentées, mettent, elles aussi, en place des stratégies de distanciation sociale pour faire face à la menace de parasites. Afin de limiter les contacts entre individus, et ici le risque de transmission du *Varroa destructor*, l'utilisation spatiale de la ruche et les modalités d'interactions sociales sont bouleversées, montre une étude de l'université de Sassari, en Sardaigne (Italie). Les colonies sont divisées en deux parties distinctes : les niveaux extérieurs regroupent les abeilles ouvrières, plus âgées, comme les butineuses qui rapportent du nectar, tandis que la partie centrale abrite les abeilles les plus jeunes, leurs nourrices ainsi que la reine. Ces dernières, qui assurent la survie de la colonie, sont ainsi mieux protégées. **A. T.**

ERIC TOURNERET / BIOSPHOTO – KIM TAYLOR / NATUREPL

« Apis mellifera » divise la ruche en deux espaces pour limiter les contaminations.

NASA / AFP

Les fractures du glacier pourraient libérer une armada d'icebergs d'ici cinq ans.

Le « glacier de l'apocalypse » menace de s'écrouler

RÉCHAUFFEMENT L'immense glacier Thwaites, en Antarctique, inquiète les glaciologues : son plateau, qui s'étend en mer sur des centaines de kilomètres, présente des fractures géantes qui pourraient libérer une armada d'icebergs d'ici à cinq ans. Celui qu'on surnomme « le glacier de l'apocalypse » s'écoulerait alors plus vite que prévu dans l'océan et contribuerait à l'élévation de la mer jusqu'à 65 cm. **S. R.**

SOURCE : ERIN PETTIT, UNIVERSITÉ DE L'OREGON, ÉTATS-UNIS.

EN DEUX MOTS

IVOIRE L'Union européenne a annoncé la suspension du commerce de l'ivoire brut, sauf dans le but exclusif de réparer des objets contenant de l'ivoire ancien. **TSUNAMI** Une étude révèle que le champ magnétique généré par un tsunami peut être détecté quelques minutes avant les changements du niveau de la mer et pourrait ainsi améliorer les systèmes d'alerte. **ÉLEVAGE** Depuis le 1er janvier, tous les élevages de France doivent avoir nommé un référent « bien-être animal » avec une formation spécifique à ces enjeux.

–17 % La baisse de la prédation par des ours des Pyrénées en 2021

ÉCOLOGIE Les services de l'État ont recensé une baisse significative de la prédation des animaux d'élevage par l'ours entre janvier et octobre 2021. Sa responsabilité ne peut être écartée pour 456 ovins retrouvés blessés ou morts, dont 358 en Ariège, contre 658 animaux touchés en 2020. La mise en place de filets électrifiés et de chiens ainsi que le renforcement des équipes de bergers d'appui expliqueraient ce bon résultat. **L. C.**

Découverte du premier vrai mille-pattes

PAULE MAREK ET AL.

Cet « Eumillipes persephone » (à droite) doté de 1306 pattes (à gauche, en vue ventrale) a été découvert en Australie.

ENTOMOLOGIE Pour la première fois, un myriapode gambadant sur plus de 1000 pattes a été identifié. Jusqu'à présent, le record était de 750. *Eumilipes persephone* en possède 1306 précisément. Découvert par hasard en Australie dans une poche souterraine, l'animal au corps très allongé vit dans l'obscurité totale : il est dépourvu d'yeux et sa peau est incolore. **H. R.**

SOURCE : JUANITA RODRIGUEZ, AUSTRALIAN NATIONAL INSECT COLLECTION, AUSTRALIE.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs chaque jeudi de 17H30 à 19H sur https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

MICHEL GUNTHER / BIOSPHOTO

Chez ces oiseaux marins monogames, le réchauffement climatique est directement responsable d'une hausse des divorces.

Le taux de divorce chez les albatros double avec la chaleur

ÉTHOLOGIE Le taux de divorce chez les albatros des îles Malouines, habituellement de 4 %, grimpe à près de 8 % les années les plus chaudes, selon des observations menées entre 2004 et 2019. Une eau réchauffée est moins riche en nutriments, si bien que les oiseaux, contraints à de plus longs périples pour se nourrir, arrivent en piètre forme et en retard pour leurs retrouvailles. **R. M.**

SOURCE : FRANCESCO VENTURA, UNIVERSITÉ DE LISBONNE, PORTUGAL.

Des dolines abyssales découvertes aux Bahamas

GÉOLOGIE Des gouffres sous-marins géants ont été découverts au pied de la plateforme des Bahamas, qui s'élève jusqu'à 4 km au-dessus de la plaine abyssale. 29 dépressions, d'un diamètre de 255 à 1819 m et d'une profondeur de 30 à 185 m, ont ainsi été dénombrées. Ces dolines se seraient formées par dissolution lorsque le niveau de la mer était plus bas. **S. R.**

SOURCE : THIBAULT CAVAILHES, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, FRANCE.

450 000 tonnes
La masse de déchets électriques non recyclés en France

POLLUTION Tous les ans, près d'un demi-million de tonnes de déchets électriques et électroniques échappe aux filières françaises officielles de recyclage. Ces téléviseurs, ordinateurs, appareils ménagers sont captés par des entreprises illégales qui récupèrent les métaux sans précautions de dépollution. **L. C.**

SOURCE : DAVID ROCHAT, SOFIES INTERNATIONAL, FRANCE.

Un cargo tiré par une aile volante

TRANSPORTS Un cargo convoyant des tronçons d'avions Airbus sera tracté par une voile de 500 voire 1000 m², montée sur un mât pliable fixé à l'avant du bateau. La société nantaise AirSeas va tester pendant six mois ce système : il se commande depuis la cabine de pilotage et la voile s'oriente en fonction du vent et des données météorologiques captées en temps réel. A. D.

La voile montée à l'avant du navire permettra d'effectuer des économies de carburant.

AIRSEAS

CHRISTIAN BENDIX

L'ADN extrait de l'air collecté à proximité d'un animal a permis de l'identifer.

L'ADN se détecte même dans l'air

Les espèces animales terrestres peuvent être identifiées grâce à leurs traces d'ADN dans l'air.

L'analyse des traces d'ADN en suspension dans l'air permet de détecter efficacement les espèces animales terrestres présentes à proximité, révèlent deux études publiées dans *Current Biology*. Les deux équipes indépendantes danoise et britannique avaient choisi comme terrain d'expérience le zoo de Copenhague, au Danemark, et celui d'Hamerton, au Royaume-Uni. Les méthodes de filtrage de l'ADN environnemental étaient différentes, mais les résultats ont été chaque fois probants. Les Britanniques ont ainsi identifié 25 espèces animales — tigres, lémuriens, dingos… — tandis que les Danois ont détecté 49 espèces de mammifères, oiseaux, amphibiens, reptiles et poissons. Les chercheurs ont même pu déceler des espèces vivant hors des zoos, tel le hérisson eurasien au Royaume-Uni et des campagnols et écureuils roux à Copenhague. **S. R.**

DU 14 AU 22 MAI 2022

PARIS ✈ REYKJAVIK
TROMSO ✈ PARIS

Jour	Escales	Arrivée	Départ
14/05	Paris / Reykjavik *(Islande)* ✈	Nuit à quai	
15/05	Reykjavik *(Islande)*	Appareillage 17h00	
16/05	Isafjordur *(Islande)*	08h30	18h00
17/05	Husavik *(Islande)* ⚓	08h30	17h30
18/05	Seydisfjordur *(Islande)*	08h00	12h00
19/05	En mer		
20/05	Rorvik *(Norvège)*	16h00	20h00
21/05	Leknes / Îles Lofoten *(Norvège)* ⚓	13h00	19h00
22/05	Tromso *(Norvège)* / Paris ✈	09h30	-

⚓ À l'ancre - Débarquement en chaloupe si les conditions météorologiques le permettent.

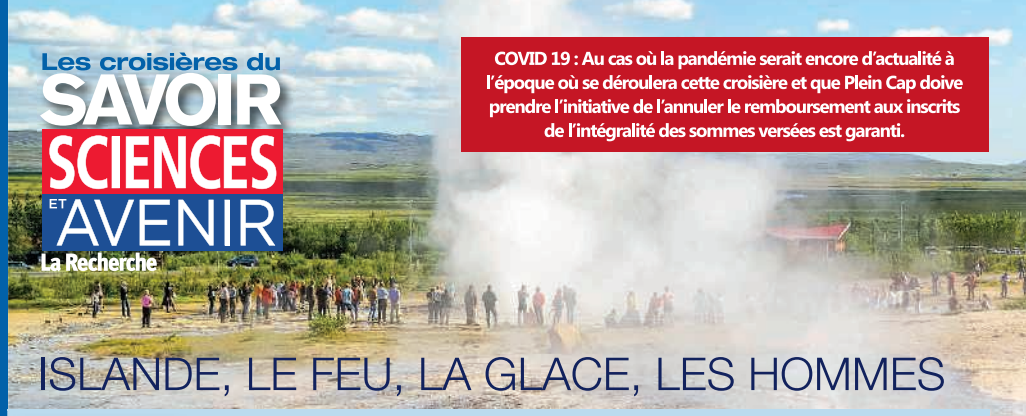
À partir de 2.390 €

par personne en **cabine intérieure, catégorie 2** occupée par **2 personnes.**

(vols internationaux inclus, **hors excursions optionnelles et pourboires facultatifs)**

Ce prix comprend :

- La croisière à bord du M/s Hamburg en pension complète du dîner du 1er jour au petit déjeuner du dernier jour, boissons aux repas incluses.
- Les vols (réguliers ou affrétés) Paris - Reykjavik et Tromso-Paris.
- La présence (* sauf raison de force majeure) pendant toute la croisière, et les conférences, des scientifiques invités par Sciences et Avenir.
- Des animations de qualité chaque soir variétés, soirée classique etc.).
- L'équipe d'encadrement Plein Cap.
- Les assurances assistance rapatriement.



COVID 19 : Au cas où la pandémie serait encore d'actualité à l'époque où se déroulera cette croisière et que Plein Cap doive prendre l'initiative de l'annuler le remboursement aux inscrits de l'intégralité des sommes versées est garanti.

ISLANDE, LE FEU, LA GLACE, LES HOMMES

CAROLE CHATELAIN
Directrice de la rédaction de *Sciences et Avenir - La Recherche*

RÊVE DE GLACE. Les noms, à eux seuls, font rêver : Isafjordur, Husavik, Osvor... Et même celui de la capitale, Reykjavik, qui sonne comme une stalactite de glace. Avec l'Islande, mot francisé de l'*Ísland* (terre de glace en islandais), surgissent des images de fjords, de baleines, de geysers. Le pays souffle d'emblée le froid, le chaud et l'envie d'en savoir plus. Cela tombe bien. A bord du Ms. Hamburg, aux côtés d'Yves Coppens, préhistorien-parrain des Croisières du Savoir, embarqueront trois connaisseurs des trésors que recèlent ces lieux. Les fameuses sagas islandaises, que décryptera la docteure en études nordiques Gaëlle Reneteaud. Mais aussi l'océan si froid et si riche en poissons et mammifères marins, sans secret pour Gilles Boeuf, ancien directeur du Museum et ami de Sciences et Avenir. Quant aux volcans sous la glace, le Pr Jacques-Marie Bardintzeff nous en dressera un portrait saisissant. Et nous n'oublierons pas la découverte au retour par la Norvège des îles Lofoten et du ravissant port de Rorvik. Vite, embarquons !

ILS SERONT AVEC VOUS PENDANT TOUTE LA CROISIÈRE *

YVES COPPENS

Paléontologue, spécialiste mondialement connu de l'évolution humaine, académicien et professeur au Collège de France. Il nous parlera du peuplement des îles que nous allons accoster, de la préhistoire aux moines irlandais et aux Vikings. Dernier ouvrage paru : « *Origines de l'Homme, origines d'un homme* ».

GAËLLE RENETEAUD

Docteur en Etudes Nordiques de l'Université Paris-Sorbonne, spécialiste de l'Islande. Elle nous dira ce que sont les *sagas* et leur place dans la culture islandaise et nous racontera le regard porté sur l'Islande dans la cartographie ancienne et les premiers récits de voyage. Dernier ouvrage paru : « *Le(s) Nord de Xavier Marmier* ».

GILLES BOEUF

Biologiste, spécialiste de la biodiversité marine et terrestre, professeur à Sorbonne-Université. il nous expliquera l'extraordinaire richesse du monde marin, ainsi que l'importance vitale pour l'humanité, mais aussi l'extrême fragilité, de la biodiversité. Dernier ouvrage paru : « *La biodiversité, de l'océan à la cité* ».

JACQUES-MARIE BARDINTZEFF

Volcanologue professeur à l'Université Paris-Sud Orsay. Il nous présentera les volcans d'Islande et leurs éruptions, les geysers et la géothermie, les paysages étonnants. Il nous expliquera comment des volcans prennent naissance au fond des océans puis émergent en îles. Dernier ouvrage paru : « *Volcanologue* ».

Avec

OLIVIER LASCAR

Rédacteur en chef du pôle digital de Sciences et Avenir

Pendant la croisière l'œil de Lascar restera ouvert, pertinent et... impertinent !

Une occasion exceptionnelle de larguer les amarres pour vivre neuf belles journées d'évasion entre ciel et terre. Des journées denses, rythmées par les nombreux plaisirs de la vie à bord, de passionnantes conférences et des rencontres avec des compagnons de voyage partageant les mêmes motivations et les mêmes curiosités.
Et bien sûr les excursions à la découverte de ces terres septentrionales aux somptueux paysages dont vous garderez un souvenir inoubliable !

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : **PLEIN CAP « Croisière du Savoir »**

CROISIÈRES PLEIN CAP : **251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET** - **info@plein-cap.com** - Tél. **04 93 20 21 20**

Programme complet, renseignements et inscriptions sur le site web : croisiere-du-savoir.fr

IM006120053

Il y aurait trois maladies d'Alzheimer

Des chercheurs révisent l'approche de cette maladie neurodégénérative en combinant des causes génétiques et environnementales.

PATRICK ALLARD/REA

Distinguer les trois types d'Alzheimer permettrait d'élaborer des traitements spécifiques.

Un nouveau modèle pour mieux appréhender la maladie d'Alzheimer : c'est ce que propose un consortium de chercheurs qui va jusqu'à remettre en cause l'hypothèse amyloïde. Communément admise, celle-ci postule que la cause de la maladie est une cascade inéluctable d'événements conduisant à la neurodégénérescence. L'accumulation de protéines bêta-amyloïdes en plaques conduit à l'augmentation de protéines tau qui, elles, dégradent les neurones. C'est ce mécanisme que cible le premier médicament contre Alzheimer, l'Aduhlem (aducanumab), mis sur le marché aux États-Unis en juin 2021. Sauf que les bénéfices de l'Aduhlem se sont révélés limités. *« Il aurait dû se montrer beaucoup plus efficace »*, note Giovanni Frisoni, professeur à l'université de Genève (Suisse) et coauteur d'une étude dans *Nature Reviews Neuroscience,* qui propose ainsi une révision conceptuelle : Alzheimer serait non pas une, mais trois maladies avec des dynamiques spécifiques.

L'hypothèse amyloïde concernerait 1 % des cas

L'hypothèse de la cascade amyloïde ne se vérifierait ainsi que pour les patients d'un premier sous-groupe (moins de 1 % des cas) touchés par une mutation génétique héréditaire à l'origine de cette cascade. Les deux autres types d'Alzheimer se déclarent plus tardivement et se distinguent selon la présence ou non d'une variation d'un autre gène, l'APOE. *« Deux personnes sur trois porteuses de cette variation développeront plus ou moins tardivement les symptômes de la maladie »*, précise Giovanni Frisoni. Dans le troisième groupe qui ne présente pas ce déterminant génétique (30 à 40 % des cas), le développement de la maladie est encore moins prévisible : la cascade amyloïde y est influencée par une combinaison de facteurs (génétiques, environnementaux) plus complexe. Selon les chercheurs, prendre en compte ces différences permettrait d'élaborer des traitements spécifiques avec de meilleures chances de succès. ■ **A. T.**

IL A DIT

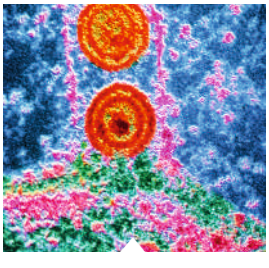
« Omicron est sûrement le virus qui se propage le plus rapidement parmi tous ceux qu'on a pu étudier à ce niveau de détail »

William Hanage, épidémiologiste, codirecteur du Centre sur la dynamique des maladies infectieuses à l'université Harvard (États-Unis), à propos du nouveau variant du coronavirus qui infecte plus d'un million de personnes chaque jour dans le monde depuis début janvier 2022.

Comment l'herpès infiltre les neurones

VIROLOGIE Une étude montre que le virus de l'herpès HSV-1 dérobe des moteurs cellulaires (nommés des kinésines) à des cellules épithéliales avant d'entrer dans les neurones qu'il infecte. Il se sert ensuite de ces petits moteurs pour voyager le long des neurones et atteindre le noyau cellulaire où il insère son génome dans celui de la cellule hôte. C'est ainsi qu'il persiste dans l'organisme et se réactive plus ou moins fréquemment. **N. G. C.**

SOURCE : JEFFREY SAVAS, UNIVERSITÉ NORTHWESTERN, CHICAGO, ÉTATS-UNIS.



SPL/PHANIE

Ce virus (vu au microscope) touche la moitié des adultes.

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

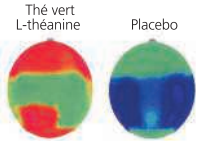
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Cerveau Clair 60 cp est disponible en pharmacie et espaces diététiques sous le code **ACL 295 18 63**
Questions ? Les experts New Nordic vous répondent au 01 85 42 38 83 (tarif local).
www.vitalco.com

UNIVERSITY OF MARYLAND SCHOOL OF MEDICINE / AFP

Cette transplantation d'organe, réalisée à l'université du Maryland (États-Unis) le 7 janvier, est une première mondiale.

Le cœur d'un cochon OGM implanté chez un homme

L'animal a été modifié génétiquement pour limiter le risque de rejet immunitaire.

À peine trois mois après la xénogreffe de rein de cochon — que *Sciences et Avenir – La Recherche* avait retenu dans son choix des 10 découvertes de l'année 2021 *(lire* S. et A. *n° 899, p. 42)* —, une équipe de l'université du Maryland (États-Unis) est parvenue à implanter pour la première fois un cœur porcin chez un homme sans induire de rejet immédiat. Le patient, âgé de 57 ans, avait été hospitalisé six semaines auparavant à cause d'une arythmie importante. En raison de la sévérité de sa maladie, il n'était pas éligible à une transplantation de cœur, humain ou artificiel. Seule option : cette greffe de cœur de cochon, qu'il a acceptée après avoir été informé des risques d'une telle intervention. L'animal a été modifié génétiquement pour limiter le risque de rejet immunitaire, avec quatre gènes porcins retirés et six gènes humains ajoutés. Opéré le 7 janvier, le patient était dans un état stable trois jours après. **N. G. C.**

EN DEUX MOTS

MICROBIOTE Des chercheurs de l'Inserm montrent que le carboxyméthylcellulose, un émulsifiant très utilisé par l'industrie alimentaire, altère l'environnement intestinal. **TABAC** Le Haut Conseil de santé publique estime que la cigarette électronique ne doit plus être proposée comme outil de sevrage tabagique faute de recul suffisant sur ses effets à long terme. **SUCRE** Selon une étude, les adolescents dormant moins de huit heures par nuit tendent à consommer jusqu'à 2 kg de sucre de plus que les autres sur une année scolaire.

UTSOUTHWESTERN

Ce dispositif limiterait les maux oculaires après un vol.

Un sac de couchage protecteur pour astronautes

OPHTALMOLOGIE Des chercheurs ont mis au point un sac de couchage high-tech destiné à remédier au « syndrome neuro-oculaire associé au vol spatial » que subissent 70 % des astronautes une fois de retour sur Terre. Ces troubles oculaires (migraines, œdèmes, vue troublée…) pourraient être limités par ce dispositif qui enserre le bas du corps : en créant des différences de pression, il force le sang à redescendre et évite la surpression au niveau de la tête. **S. R.-M.**

SOURCE : CHRISTOPHER HEARON, UNIVERSITÉ DU TEXAS, ÉTATS-UNIS.

1,85 million — Le nombre de cas d'asthme chez l'enfant liés à la pollution chaque année dans le monde

PNEUMOLOGIE La pollution au dioxyde d'azote, due au trafic automobile, provoque près de 2 millions de cas d'asthme pédiatrique dans le monde chaque année, selon une étude d'ampleur inédite croisant les données de pollution atmosphérique d'environ 13 000 villes avec l'incidence de cette maladie entre 2000 et 2019. **C. L.**

SOURCE : SUSAN ANENBERG, UNIVERSITÉ GEORGE-WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

Une protection à long terme contre le VIH

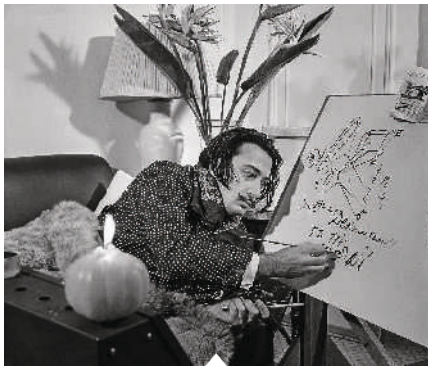
INFECTIOLOGIE Une seule injection d'un nouvel antirétroviral a permis de bloquer pendant six mois chez le singe des infections répétées par le virus du sida. Le lenacapavir, un produit similaire, est d'ailleurs en cours de test chez des personnes exposées au VIH et pourrait remplacer à terme la PrEP, le traitement préventif actuel pris tous les jours par les personnes à risque. **P. K.**

SOURCE : SAMUEL VIDAL, FACULTÉ DE MÉDECINE HARVARD, ÉTATS-UNIS.

Le sommeil interrompu renforce bel et bien la créativité

NEUROSCIENCES **Des scientifiques ont montré que l'activité du cerveau entre le sommeil et l'éveil favorise la découverte soudaine d'une solution à un problème. Après un léger temps de sommeil vite interrompu, les participants à l'étude résolvaient une tâche arithmétique avec plus de facilité et d'ingéniosité que les autres. La méthode — dont était adepte le peintre Salvador Dalí — d'interrompre le sommeil lors du premier stade de l'endormissement renforce donc bel et bien la créativité.** **N. M.**

SOURCE : CÉLIA LACAUX, INSTITUT DU CERVEAU, FRANCE.



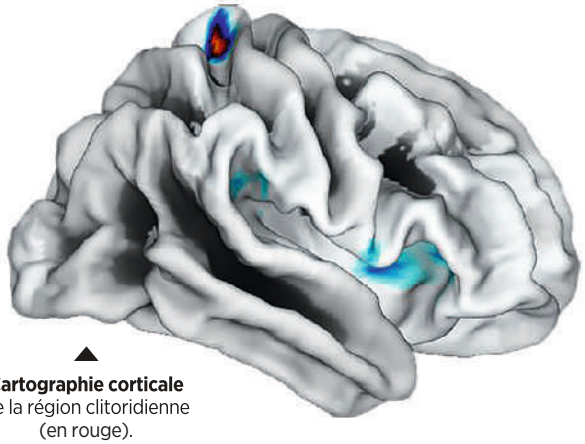
BETTMANN/GETTY IMAGES

Salvador Dalí utilisait l'interruption de sommeil pour stimuler sa créativité.

Voici la zone cérébrale correspondant au clitoris

NEUROLOGIE Pour la première fois, la représentation du clitoris dans le cerveau féminin a été localisée avec précision dans le cortex somato-sensoriel où chaque partie du corps correspond à une aire différente, formant une sorte de carte corporelle cérébrale. Pour y parvenir, les neuroscientifiques ont stimulé chez 20 femmes l'organe érectile tout en réalisant une IRM de leur cerveau. Plus les femmes avaient eu de rapports sexuels les douze derniers mois, plus l'épaisseur de l'aire génitale était importante. **H. J.**

SOURCE : CHRISTINE HEIM, HÔPITAL UNIVERSITAIRE DE LA CHARITÉ À BERLIN, ALLEMAGNE.



KNOPET AL.

Cartographie corticale de la région clitoridienne (en rouge).

www.lesproduitsdumois.com

RETROUVER BIEN-ÊTRE ET SÉRÉNITÉ

Zenytud est une formule à la fois puissante et naturelle, idéale en situation de mal-être et notamment de burn-out.

Elle associe des extraits végétaux concentrés (Rhodiola, Safran) à Lactium® (un ingrédient breveté) ainsi que des vitamines (B3, B6, B9) et minéraux essentiels (Magnésium).

Ensemble, ils agissent sur les neurotransmetteurs les plus importants dans les troubles anxieux (GABA, sérotonine, dopamine) tout en **favorisant des fonctions psychologiques normales, une réduction de la fatigue et une humeur positive**.

Sans effet indésirable ni accoutumance.

■ En pharmacie - Boîte de 60 gélules végétales. ACL 6024255
Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local) - zenytud.com
Formule très concentrée, demandez un avis médical si vous prenez des médicaments.

GÉREZ LE STRESS ET BOOSTEZ VOTRE ÉNERGIE !

Dans notre quotidien agité, marqué par la pression psychologique, la recherche de performances et de résultats immédiats, les situations de stress sont nombreuses.
Retrouvez énergie et sérénité grâce à **D-Stress® Booster** !

Sa formule unique et brevetée agit durablement sur les situations de stress au quotidien.
Un sachet de **D-Stress® Booster** contient 200 mg de magnésium et des vitamines B qui contribuent au métabolisme énergétique et à la diminution du stress.

D-Stress® Booster votre allié contre le stress !
Agit en 30 min, sans accoutumance.

Prendre 1 sachet par jour, le matin à diluer dans de l'eau ou jus de fruit.

● Laboratoire Synergia. En pharmacie, env. 17€, boîte 20 sachets, ACL 5136879 ou commandez sur www.synergiashop.com ou par téléphone au 04 77 42 30 10.

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE

Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

Une prothèse de genou connectée

ORTHOPÉDIE Une prothèse de genou connectée, FollowKnee, développée par le CEA, l'Inserm et le CHU de Brest (Finistère) a été présentée au CES de Las Vegas (États-Unis), le salon de l'électronique grand public. Le dispositif intègre des minicapteurs connectés capables d'alerter sur une infection débutante ou des défauts mécaniques. Des données pour améliorer la rééducation peuvent même être transmises au smartphone du patient ou de son médecin. **S. R.-M.**

KLEPACH/SHUTTERSTOCK

Consommer des poissons exposés au mercure ne présenterait pas de risque.

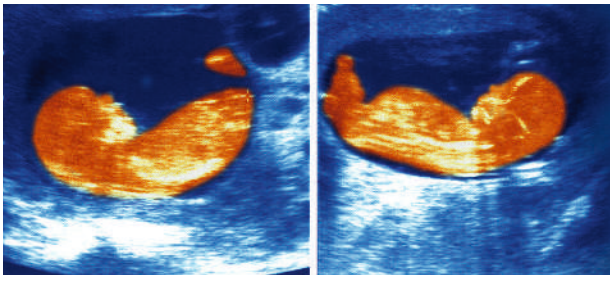
Malgré la présence de mercure, le poisson ne nuit pas à la santé

NUTRITION Même si les poissons et fruits de mer ont tendance à contenir du mercure dans leur chair, les consommer ne présenterait pas de danger pour la santé. Dans un échantillon de 17 000 adultes américains suivis sur dix ans, l'exposition au mercure provenant de la consommation habituelle de fruits de mer n'était pas associée à un risque de décès d'origine cardio-vasculaire ou autre. **H. J.**

SOURCE : YANGBO SUN, UNIVERSITÉ DU TENNESSEE, ÉTATS-UNIS.

On connaît l'origine de la migraine

La propension à développer les céphalées pourrait être la conséquence d'une surexposition à des hormones dans le ventre maternel.



JAMESCAVALLINI/BSIP

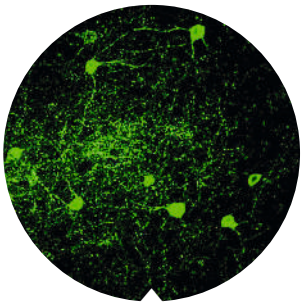
Chez les jumeaux, les filles ont un risque plus élevé de migraine que leur frère.

La migraine prend sa source durant la grossesse. C'est la conclusion d'une étude conduite à l'université de Californie à San Diego (États-Unis). Les chercheurs se sont servis d'une base de données sur les jumeaux : 51 872 individus ont été passés au crible pour identifier ceux souffrants de migraine. Premier enseignement : l'environnement prénatal semble augmenter le risque d'être migraineux. Ensuite : des facteurs génétiques, qu'il reste à déterminer, pourraient expliquer les différences entre hommes et femmes. En effet, si la migraine touche environ 12 % de la population, elle affecte sept fois plus les femmes. Une donnée qui se retrouve dans les travaux des chercheurs : les filles ayant un jumeau ont un risque de migraine plus élevé que si elles ont une jumelle. Ce qui suggère, selon les chercheurs, que des facteurs prénataux — comme les niveaux d'hormones *in utero* — pourraient contribuer au risque de développer le syndrome. **H. R.**

Deux marqueurs sanguins de la schizophrénie identifiés

PSYCHIATRIE Deux biomarqueurs de la schizophrénie ont été découverts : la première molécule est centrale dans le « système de nettoyage » des neurones, la seconde est un produit de la respiration cellulaire. Toutes deux peuvent être dosées dans le sang, et permettent d'établir deux catégories de patients pour cette pathologie, une classification utile au développement de traitements spécifiques. **A. T.**

SOURCE : I. KHADIMALLAH, CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE VAUDOIS, SUISSE.



KIMDOETAL.

Le dysfonctionnement de certains neurones (ici chez la souris) est détectable dans le sang.

Des implants neuronaux pilotables à distance

NEUROSCIENCE Des chercheurs ont mis au point des implants neuronaux connectés permettant d'effectuer des expériences à distance, par Internet. Utilisable sur des rongeurs, cette innovation apporte une solution aux limites qui freinent actuellement les recherches en neuroscience comportementale, comme le biais introduit par l'observateur ou le suivi des expériences hors laboratoire. **A. T.**

SOURCE : R. QAZI, INSTITUT SUPÉRIEUR CORÉEN DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES, CORÉE DU SUD.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

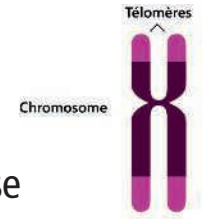
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

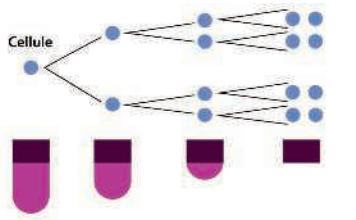
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

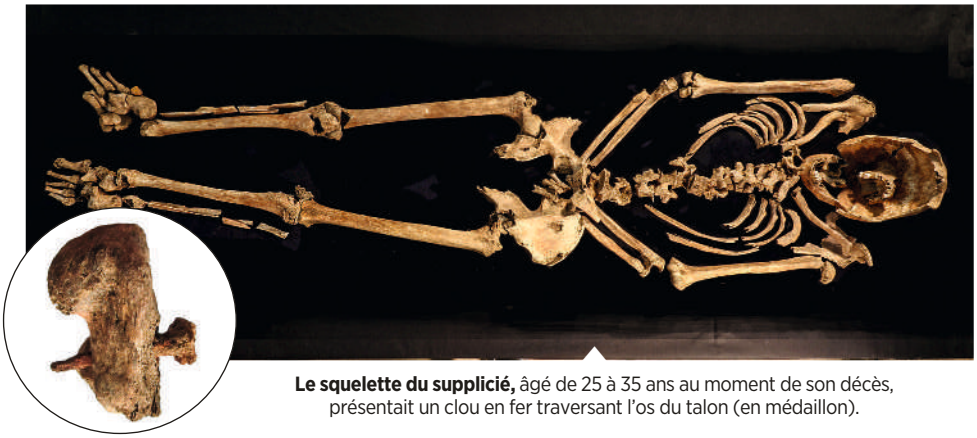
Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Disponible en pharmacie et espace diététique

Telomerys
60 gélules végétales
ACL 602 42 56
Des questions ? Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 42 38 48** (tarif local) et sur www.telomerys.com.

La crucifixion était pratiquée dans le nord de l'Europe

Les premières traces de ce supplice répandu dans l'Empire romain ont été découvertes sur un site archéologique en Angleterre.



ADAM WILLIAMS-ALBION ARCHAEOLOGY

Le squelette du supplicié, âgé de 25 à 35 ans au moment de son décès, présentait un clou en fer traversant l'os du talon (en médaillon).

De rarissimes traces de crucifixion, l'un des châtiments les plus inhumains pratiqués dans l'Antiquité, ont été retrouvées pour la première fois en Angleterre. Un squelette de près de 1900 ans, présentant un clou en fer planté dans l'os du talon a en effet été exhumé sur le site romain de Fenstanton (comté de Cambridge). Âgé de 25 à 35 ans au moment du décès, le supplicié pourrait être une victime de cette peine capitale infamante appliquée dans l'Empire romain dès le IIIe siècle avant J.-C. Ce n'est que lors des analyses en laboratoire que le corps étranger en fer — recouvert de boue et dépassant de peu du talon — a été repéré sur la dépouille. Il s'agirait à ce jour du seul exemple de crucifixion identifié dans le nord de l'Europe. Des datations au radiocarbone ont fixé entre 130 et 360 après J.-C. le moment du décès de l'homme de Fenstanton. Ses os présentaient aussi des signes de traumatisme *ante mortem*, en particulier des infections et inflammations au niveau des membres inférieurs, sans doute dues à la présence d'entraves ou de chaînes.

Une exécution très lente et douloureuse

Bien que la crucifixion ait été courante dans le monde romain, les traces ostéologiques de cette pratique sont extrêmement rares. Lors de cette exécution très douloureuse et lente, des clous étaient enfoncés dans les poignets ou les avant-bras des condamnés pour les fixer à la barre transversale d'une croix en bois (*patibulum*), ainsi que dans les pieds. Les pointes étaient plantées soit dans les os du talon (au niveau du calcanéum), soit à travers les métatarses, au milieu du pied. La croix était ensuite redressée sur le bord d'une route ou au sommet d'une élévation, afin d'exposer la victime à la vue de tous. Le crucifié mourrait d'épuisement dans d'atroces souffrances, au terme d'une asphyxie progressive liée à sa position. C'est à l'empereur Constantin Ier (272-337) que l'on doit d'avoir interdit la pratique de ce *summum supplicium*. ■ **B. A.**

1500

Le nombre de langues menacées de disparition d'ici à 2100

LINGUISTIQUE Sur les 7000 langues reconnues à ce jour dans le monde, plus de la moitié sont en danger, selon une étude publiée dans *Nature Ecology and Evolution*. *« Nous avons constaté que sans intervention immédiate, la perte de langues pourrait tripler au cours des 40 prochaines années, et d'ici à la fin du siècle, 1500 langues pourraient avoir cessé d'être parlées »*, concluent les chercheurs. **B. A.**

SOURCE : LINDELL BROMHAM, UNIV. NATIONALE AUSTRALIENNE, AUSTRALIE

Un dépôt de « post-it » égyptiens

ARCHÉOLOGIE Un exceptionnel trésor de 15 000 ostraca, des tessons de poteries recouverts de textes antiques, a été exhumé sur le site archéologique d'Athribis, en Égypte. C'est le plus important dépôt d'époque gréco-romaine jamais exhumé sur les rives du Nil. Équivalents de nos « post-it », ces fragments de céramiques étaient utilisés par les Égyptiens pour y inscrire de courts textes. **B. A.**

PROJET ATHRIBIS, UNIVERSITÉ DE TÜBINGEN

Ce tesson de poterie était utilisé pour inscrire de courts textes.

Les chevaliers anglais chevauchaient… des poneys

ARCHÉOLOGIE Souvent présentés comme des bêtes massives et puissantes, les chevaux de guerre médiévaux ne dépassaient sans doute pas la taille de nos poneys actuels, soit moins de 150 cm au garrot. C'est ce que révèle l'analyse du plus grand ensemble de données d'ossements de chevaux anglais datant de 300 à 1650, issus de 171 sites distincts. **H. J.**

SOURCE : CARLY AMEEN, UNIV. D'EXETER, ROYAUME-UNI.

MUSÉE NATIONAL DANEMARK

Cette boucle d'oreille en or pourrait avoir été offerte par un empereur byzantin à un chef viking.

Byzance en terre viking

ARCHÉOLOGIE **Trouvée dans un champ près de la ville de Bøvling, dans l'ouest du Jutland (Danemark), cette délicate boucle d'oreille en or est la toute première du genre découverte en Scandinavie. Et pour cause : les Vikings ne rapportaient de leurs voyages presque jamais de bijoux ouvragés, préférant les pièces d'argent. Sans doute fabriquée en Égypte au XIe siècle, elle pourrait, selon les experts, avoir été offerte par un empereur byzantin à un chef viking.** **M. B.**

SOURCE : MUSÉE NATIONAL DE COPENHAGUE, DANEMARK.

Sur la piste du légendaire temple d'Hercule Gaditanus

ANTIQUITÉ Une équipe d'archéologues a annoncé avoir localisé grâce au Lidar d'importants vestiges sous-marins dans la baie de Cadix (Espagne). Il pourrait s'agir de ceux du sanctuaire d'Hercule Gaditanus, l'un des plus renommés de l'Antiquité. Construit par les Phéniciens au IXe siècle avant J.-C. au moins, il était dédié à Melqart, équivalent du demi-dieu grec Héraclès. **M. B.**

SOURCE : UNIV. DE SÉVILLE, ESPAGNE.

EN DEUX MOTS

EXTINCTION La météorite de Chicxulub, à l'origine de la disparition des dinosaures il y a 66 millions d'années, s'est écrasée sur la Terre entre la fin du printemps et le début de l'été selon une datation inédite. **HISTOIRE** Sur les 429 victimes de l'attaque japonaise de Pearl Harbour en 1941 qui restaient à identifier, 355 ont retrouvé leur identité après des recherches ADN. **DOMESTICATION** La découverte d'une ancienne dent canine sur l'île Moresby, à l'ouest du Canada, révèle que les chiens ont été domestiqués il y a au moins 13 100 ans.

Un embryon de dinosaure parfaitement fossilisé

Les os révèlent une position jamais vue chez un dinosaure et similaire à celle que l'on observe chez les oiseaux modernes.

C'est l'un des embryons de dinosaure les mieux conservés qui a été exhumé à Ganzhou, dans le sud de la Chine. Baptisé « Baby Yingliang » par les chercheurs de l'université de Birmingham, au Royaume-Uni, ce fossile d'oviraptosaure daté de 72 à 66 millions d'années est contenu dans un œuf de 17 centimètres de long. Mais l'embryon lui-même mesure 27 centimètres de la tête à la queue : il a le dos plié, tête rentrée sur le ventre avec les pattes situées de part et d'autre. Une position encore jamais vue chez un dinosaure, mais bien connue chez les oiseaux : elle leur permet en effet de maximiser les chances d'éclosion. *« Cela indique qu'un tel comportement* [embryonnaire] *chez les oiseaux modernes trouve son origine chez leurs ancêtres dinosaures »*, relève Fion Waisum Ma, coauteure de la découverte publiée dans *iScience*. De fait, les oviraptorosaures, dont le nom signifie « lézard voleur d'œufs », étaient des dinosaures à plumes vivant en Asie et en Amérique du Nord durant l'époque du crétacé supérieur. **H. J.**

XINHUA/ABACAPRESS.COM

L'œuf mesure 17 cm de long et serait vieux de 72 à 66 millions d'années.

« Quetzalcoatlus » s'accroupissait avant de bondir pour déployer ses ailes immenses.

JAMES KUETHER

KEVIN PADIANET AL/ JOHNCONWAY

Voici comment décollait le ptérosaure géant

PALÉONTOLOGIE Pour prendre son envol, le *Quetzalcoatlus*, un ptérosaure gigantesque du crétacé, haut de 3,6 m, pratiquait le saut en hauteur avec de puissants appels de pied. Des études biomécaniques montrent qu'il était capable de faire des bonds de 2,4 m de haut lui permettant de déployer ses ailes, dont l'envergure atteignait 11 à 12 m. **R. M.**

SOURCE : KEVIN PADIAN, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À BERKELEY, ÉTATS-UNIS.

IL A DIT

« Il y a 125 000 ans, des néandertaliens ont transformé une zone boisée en prairies avec des feux. C'est la plus ancienne preuve d'une modification de l'écosystème par des humains »

Wil Roebroeks, archéologue à l'université de Leyde (Pays-Bas), à propos du site de Neumark-Nord (Allemagne) marqué par des incendies répétés.

Un transfert de technologie de 2700 ans

ARCHÉOLOGIE L'analyse d'une armure en écailles de cuir vieille de 2700 ans découverte dans la tombe d'un chevalier près de Turfan, en Chine, indique que celle-ci n'a pas été fabriquée localement, mais serait originaire de l'Empire néo-assyrien. Il pourrait s'agir d'une rare preuve d'un transfert de technologie militaire précoce. **H. J.**

SOURCE : PATRICK WERTMANN, UNIVERSITÉ DE ZURICH, SUISSE

Une troisième vague migratoire de la France vers la Grande-Bretagne

GÉNÉTIQUE **L'une des plus grandes analyses génomiques d'ADN ancien prélevé sur 793 restes humains révèle qu'une importante migration humaine a eu lieu entre ce qui est aujourd'hui la France et le sud de la Grande-Bretagne à la fin de l'âge du bronze, entre 1000 et 875 av. J.-C. C'est la troisième vague migratoire identifiée après celles d'il y a 6000 ans et 4500 ans.**

SOURCE : INIGO OLALDE, HARVARD MEDICAL SCHOOL, ÉTATS-UNIS.

Un squelette raconte la destruction d'Herculanum

Les restes de cet homme ont été retrouvés sur l'ancien emplacement de la plage de cette cité romaine ensevelie en l'an 79, lors de l'éruption du Vésuve.

V. IZZO/ LIGHTROCKET/ GETTY IMAGES

La couleur rouge des os est vraisemblablement due à la vaporisation instantanée de ses tissus mous.

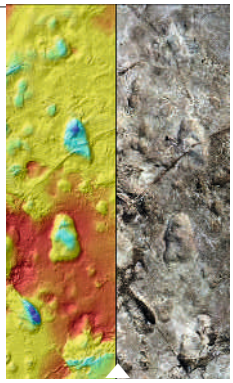
C'est seulement à quelques mètres de la mer, et donc de sa probable échappatoire, qu'il a fini par être submergé par la lave en fusion. Le squelette d'un homme d'une quarantaine d'années a été retrouvé sous des mètres de roches volcaniques à l'endroit où se trouvait à l'époque la plage d'Herculanum (Italie), cité ensevelie en l'an 79 lors de l'éruption du Vésuve. Il s'agit du premier squelette d'une victime du volcan découvert depuis quatorze ans. Lorsque le nuage pyroclastique est arrivé sur la ville voisine de Pompéi, la température était supérieure à 500 °C, de sorte que *« tout ce qui était vivant autour a été immédiatement vaporisé, à l'instar de cet homme »*, a expliqué Francesco Sirano, directeur du parc archéologique d'Herculanum.

Les restes du malheureux, qui présentaient encore des traces de tissu et d'objets métalliques, affichent une couleur rouge. La marque, sans doute, de la vaporisation instantanée de ses tissus mous. L'homme pourrait avoir cherché à rejoindre l'un des bateaux de secours mentionnés par les sources de l'époque. **M. B.**

Un mystérieux hominidé a laissé des traces de pas

PALÉOANTHROPOLOGIE C'est un hominidé encore inconnu qui a laissé des traces de pas dans la cendre de Laetoli, en Tanzanie, il y a 3,66 millions d'années. Ses empreintes de pied sont en effet différentes de ceux de sa contemporaine, l'*Australopithecus afarensis* Lucy, découverte en Éthiopie. **R. M.**

SOURCE : E. MCNUTT, UNIVERSITÉ DE L'OHIO, ÉTATS-UNIS.



AUSTIN C. HILL AND CATHERINE MILLER

Les empreintes datées de 3,66 millions d'années mises au jour en Tanzanie (en 3D à droite).

Des colons ont précédé les Vikings de 300 ans aux îles Féroé

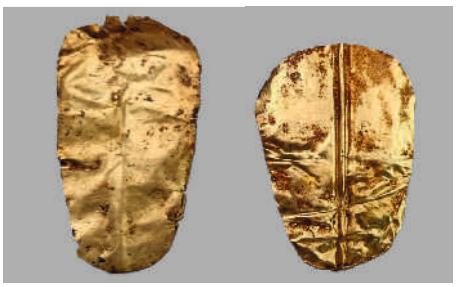
ANTHROPOLOGIE Les crottes de mouton ont parlé : des habitants sans doute venus des îles britanniques ont occupé, avec leur cheptel, les îles Féroé, un archipel de l'Atlantique Nord entre la Norvège et l'Islande, dès le début du Ve siècle. Soit 300 ans avant leur colonisation par les Vikings. De quoi confirmer les écrits du moine irlandais Dicuil qui mentionnaient, en 825, la présence d'ermites antérieure à celle des Scandinaves. **R. M.**

SOURCE : LORELEI CURTIN, OBSERVATOIRE TERRESTRE DE LAMONT-DOHERTY, ÉTATS-UNIS.

7,5 % Le taux de sel des océans primitifs

PALEO-OCÉANOGRAPHIE **Lors des 500 premiers millions d'années de la Terre, le taux de salinité des océans était trois fois supérieur à celui d'aujourd'hui. C'est la conclusion d'un nouvel outil algorithmique qui a calculé combien d'halogènes stables (chlore, fluor, brome et iode, etc.) avaient alors migré des profondeurs de la planète jusqu'à la surface.** **R. M.**

SOURCE : JUN KORENAGA, UNIVERSITÉ YALE, NEW HAVEN, ÉTATS-UNIS.



MINISTRY OF TOURISM AND ANTIQUITIES

◀ **Les feuilles dorées** étaient placées dans la bouche des défunts pour leur permettre de communiquer avec le dieu des morts.

Des momies aux « langues d'or » découvertes en Égypte

ÉGYPTOLOGIE Deux momies de la XXVIe dynastie (664 à 525 avant J.-C.) mises au jour sur le site d'El-Bahnasa, l'antique Oxyrhynchos, en Haute-Égypte, possédaient… des langues d'or ! Retrouvées dans des tombes scellées il y a 2500 ans, les précieuses feuilles avaient été placées dans la bouche des défunts pour leur permettre de s'adresser à Osiris, le dieu des morts. **B. A.**

www.sciencesetavenir.fr
www.larecherche.fr
Sciences et Avenir et *La Recherche* au quotidien

PALÉONTOLOGIE

L'évolution s'inscrit dans les ailes irisées de ce papillon

Des sous-bois jusqu'à la canopée des forêts tropicales amazoniennes, l'extraordinaire répartition des papillons *Morpho* réputés pour le bleu iridescent de leurs ailes a été étudiée par une équipe du Muséum national d'histoire naturelle et du CNRS. Les chercheurs montrent comment l'évolution de la forme des ailes leur a permis de s'adapter à autant de niches écologiques très différentes. À lire sur le site de *La Recherche*.
https://bit.ly/morphop

BIOSPHOTO

AUDIO

Sixième Science, le podcast de « Sciences et Avenir »

En partenariat avec *20 Minutes*, les meilleurs sujets scientifiques se déclinent aussi en version audio. Tous les mois, les journalistes de la rédaction évoquent les découvertes les plus marquantes et vous révèlent les coulisses de leurs enquêtes. À écouter sans modération ! sciav.fr/podcast

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

Leka au service des enfants handicapés

APF FRANCE HANDICAP

Le petit robot présenté par l'APF France handicap pourrait se révéler un allié de poids pour les professionnels du secteur médico-social. Reportage vidéo.
sciav.fr/900leka

5 minutes

La « ola » des petits poissons

JULIANE LUKAS

Des vidéos enregistrées au Mexique montrent comment de petits poissons imitent le mouvement d'une vague pour échapper aux oiseaux.
sciav.fr/mollys

10 minutes

Dans les alpages, vivre avec les patous

BIOSPHOTO

Efficace pour protéger les troupeaux du loup, le célèbre chien des Pyrénées demande un dressage trop peu pratiqué. Reportage en Savoie.
sciav.fr/900patous

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Gravitation

À la recherche de la théorie ultime

Dossier réalisé par
Franck Daninos et Fabrice Nicot

Matière noire introuvable, étrange accélération de l'expansion de l'Univers, équations d'Isaac Newton modifiées… Autant d'indices que la gravitation, revue par Albert Einstein en 1915, doit être à nouveau révisée pour rendre compte des observations les plus récentes. Des expériences étonnantes, certaines recourant à une antigravité, tentent ainsi de dépasser les pères fondateurs. Tandis que dans les laboratoires, la mesure de la constante gravitationnelle G mobilise les efforts des scientifiques du monde entier. Plus de trois siècles après sa découverte, la gravitation reste le grand enjeu de la physique.

La pomme de Newton, l'espace-temps flexible d'Einstein : ces deux symboles de la gravitation seront peut-être bientôt complétés par d'autres, comme l'antimatière par exemple (illustrée ici en inversant les couleurs de la pomme).

GARLICK/SPL/SUCRE SALÉ

Comment dépasser Newton et Einstein

Malgré leurs succès, la gravitation et son prolongement la relativité générale laissent des pans entiers de l'Univers dans l'ombre. Elles ne rendent notamment pas compte de la matière noire et de l'énergie noire qui composent 96 % de celui-ci. Des physiciens tentent de trouver des réponses au-delà des théories actuelles.

Il se passe quelque chose d'important au pays de la gravitation. Durant l'année 2021, cette théorie trois fois centenaire a fait l'objet de plusieurs publications aux intitulés un peu obscurs, voire étranges pour les non-spécialistes. Il y est question de MOND (Modified Newtonian dynamics, ou théorie de la dynamique newtonienne modifiée), d'antimatière et de gravité répulsive, ou encore de relativité intriquée *(lire l'interview d'Olivier Minazzoli p. 34)*. Autant de pistes qui se concrétisent pour aller au-delà des travaux des grands architectes de la théorie de la gravitation que furent Isaac Newton à la fin du XVII^e siècle et Albert Einstein au début du XX^e siècle. Car la gravitation est un édifice qui s'élabore pierre après pierre, siècle après siècle, comme une cathédrale. Et manifestement, elle n'est pas encore achevée… Des quatre forces fondamentales qui gouvernent l'Univers (avec l'interaction forte, faible et électromagnétique), elle demeure l'une des plus mystérieuses. Son intensité est 10^{40} fois moindre que l'interaction électromagnétique, responsable des phénomènes électriques et magnétiques. Et pourtant, sa portée semble infinie. Elle explique tout à la fois que nous gardions les pieds au sol, que la Lune tourne autour de la Terre, que le Soleil et son cortège de planètes glissent sans fin autour du centre de la galaxie… Elle dessine la géométrie de l'Univers à des échelles considérables, où les galaxies ne sont plus que des points rassemblés en amas.

HUBBLE SITE

BRIDGEMAN - AKG IMAGES

CONTEXTE

En 1687, l'Anglais Isaac Newton publie une théorie de la gravitation universelle selon laquelle tous les corps s'attirent grâce à une force proportionnelle à leur masse, et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Cette théorie semble indépassable jusqu'à ce qu'Albert Einstein, avec la relativité générale (1915), aille au-delà et résolve des problèmes que la physique newtonienne ne pouvait pas traiter. Aujourd'hui, des cosmologistes s'attaquent à la relativité générale, non pour la contredire, mais pour montrer qu'elle-même peut à son tour être dépassée, afin de décrire encore plus justement la dynamique de l'Univers.

Galilée, Newton et Einstein, les pères de la gravitation

Difficile de résumer la genèse d'une théorie qui a attiré les plus grands physiciens de leur temps. L'Italien Galilée (1564-1642) découvrit que la vitesse de chute des corps ne dépendait pas de leur masse. L'Anglais Isaac Newton (1642-1727) fit le lien entre la chute d'une pomme et le mouvement de la Lune autour du soleil. Il énonça ainsi la loi de la gravitation universelle : tous les corps s'attirent mutuellement, selon une force proportionnelle à leur masse, et inver-

La vitesse de déplacement des galaxies dans un amas est plus grande que ne le prévoit la théorie de la gravitation. De quoi mettre les chercheurs sur la piste d'une mystérieuse matière noire, ou bien d'une modification de la théorie.

sement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

Intuition géniale à l'origine d'une énigme : comment deux corps distants de plusieurs millions de kilomètres pourraient-ils exercer l'un sur l'autre une action sans lien physique entre eux ? Isaac Newton ne se prononce pas. Ce n'est pas la seule pierre d'achoppement. *« Les équations de Newton décrivent très bien le mouvement des astres, mais elles ont leur limite,* explique Cédric Deffayet, physicien spécialiste de la gravitation à l'Institut d'astrophysique de Paris. *Lorsque les vitesses deviennent très grandes, elles ne permettent plus de rendre compte des observations. Un des effets les plus connus concerne Mercure, qui, étant proche du Soleil, parcourt son orbite à la vitesse la plus élevée de toutes les planètes du Système solaire. Sa trajectoire dévie de celle prédite par Newton.* » Pour repousser les limites newtonniennes, il faudra l'audace d'Albert Einstein (1879-1955). En 1915, avec la théorie de la relativité générale, il « renverse la table ». Plus qu'adapter les lois de Newton, il change le cadre conceptuel. La gravitation n'est plus considérée comme une force mais comme une déformation de l'espace-temps sous l'effet d'une masse ou de l'énergie. Le problème de l'action à distance, sans support matériel, disparaît. La Lune, par exemple, n'est pas reliée à la Terre par un fil invisible. La Terre, par sa masse,

OLIVIER MINAZZOLI ASTROPHYSICIEN À L'OBSERVATOIRE DE LA CÔTE-D'AZUR

« Aucune théorie n'est indépassable »

Le chercheur travaille à l'élaboration de la « relativité intriquée », une théorie permettant de résoudre certains paradoxes issus de la relativité générale.

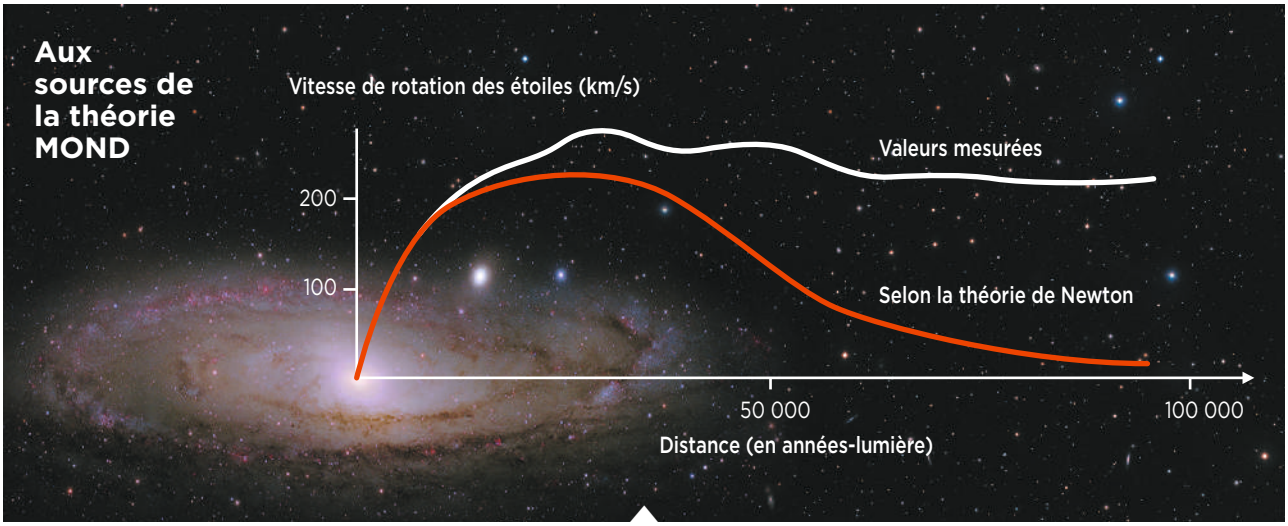
La relativité générale fait régulièrement l'objet de « tests » afin de vérifier que ses prédictions sont exactes. Elle les a toujours réussis haut la main. N'est-il pas vain de vouloir la dépasser ?
Non, car aucune théorie n'est indépassable *a priori*. La relativité porte d'ailleurs en elle ses propres limites. En 1965, le physicien britannique Roger Penrose [prix Nobel de physique 2020] a démontré qu'un astre s'effondrant en un trou noir finit toujours par former une singularité, où l'espace et le temps en quelque sorte disparaissent. Or, la relativité générale présuppose l'existence de l'espace-temps. On arrive donc au paradoxe selon lequel une théorie prédit des astres dans lesquels elle cesse d'être valide !

Vous proposez une nouvelle théorie baptisée « relativité intriquée ». Sur quoi se fonde-t-elle ?
Avec mon étudiant Hendrik Ludwig, nous sommes revenus à l'une des idées fortes d'Albert Einstein qui estimait que d'un point de vue philosophique, l'espace-temps ne pouvait pas exister sans matière. Il l'écrit dans l'article fondateur de la relativité générale. Or, le physicien néerlandais Willem De Sitter [1872-1934] a démontré que les équations de la relativité pouvaient mener à un espace-temps sans matière. Cela gênait beaucoup Albert Einstein, même s'il a fini par reconnaître la justesse des calculs. Nous sommes parvenus en 2015 à une reformulation des équations de la relativité interdisant un univers vide de matière. Dans la version d'Albert Einstein, les termes d'espace-temps et de matière s'additionnent. Dans la nôtre, espace-temps et matière apparaissent sous la forme d'une division. Le terme de matière ne peut pas être nul, ou alors il n'y a plus de théorie. Malgré cette différence radicale, nous retrouvons la relativité générale dans des situations classiques, comme dans le Système solaire par exemple. Elle est donc en bon accord avec une grande partie des observations, ce qui est enthousiasmant.

LAURENT CARRÉ/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE

La relativité intriquée a déjà six ans, et elle n'est pas encore très connue. Pourquoi ?
C'est normal, il faut d'abord qu'une théorie fasse un minimum ses preuves pour que la communauté commence à vouloir y consacrer du temps pour l'étudier. Plus particulièrement lorsqu'elle sort du cadre conceptuel habituel comme c'est le cas ici. Or, ce n'est qu'en 2021 que l'essentiel des résultats a été publié : concernant les étoiles à neutrons, les trous noirs et la cosmologie. Nous n'en sommes toujours qu'au tout début ! ■

Propos recueillis par F. N.



BRUNO BOURGEOIS

Les étoiles tournent plus vite autour du centre de la galaxie (courbe blanche) que ne le prévoit Newton (courbe rouge). La théorie MOND, élaborée par Mordehai Milgrom en 1983, propose de modifier la seconde loi de Newton pour coller aux observations.

courbe l'espace-temps autour d'elle. La Lune avance donc en ligne droite mais dans un espace courbe. Sa trajectoire semble ainsi circulaire.

Avec ce nouveau paradigme, Albert Einstein livre une série d'équations qui permettent de relier la déformation de l'espace-temps à la masse et l'énergie qu'il contient. En les appliquant au système Soleil-Mercure, il calcule correctement l'orbite de la planète. C'est le premier succès d'une théorie qui en connaîtra beaucoup d'autres, jusqu'à nos jours. Ce qui ne signifie pas pour autant qu'elle est achevée…

La matière noire sème le doute

Avec les équations d'Isaac Newton et d'Albert Einstein, les cosmologistes devaient pouvoir expliquer la dynamique de tous les corps dans l'Univers. Las, ce ne fut pas le cas ! Si l'on en croit Isaac Newton, la vitesse de rotation des étoiles autour du centre de leur galaxie augmente régulièrement avec la distance au centre, avant de décroître *(voir l'infographie ci-dessus)*. Mais en 1978, l'astronome américaine Vera Rubin remarque que la vitesse des étoiles proches du bord extérieur de leur galaxie est bien plus importante que prévu par Newton. À cette allure, elles devraient même être éjectées de la galaxie ! En 1933, l'astronome suisse Fritz Zwicky avait fait la même découverte, mais à une échelle supérieure. C'étaient carrément des galaxies entières, au sein d'amas, dont la vitesse était trop importante. Dans les deux cas, la solution proposée par les physiciens fut la même. Pour coller à la gravitation, il faut admettre que ces galaxies et amas de galaxies sont plus massifs que ce que leur matière visible, étoiles et gaz essentiellement, laisse penser. Elles renferment donc en plus une matière invisible. Ainsi est né le concept de « matière noire », une masse invisible, proposée à quarante ans d'intervalle par Fritz Zwicky et Vera Rubin.

Mais que sait-on d'elle, à part sa masse ? Pas grand-chose, si ce n'est qu'elle n'interagit presque pas avec la matière classique. Qu'elle n'émet aucun rayonnement. Bref, qu'elle ne ressemble à rien de connu. De très nombreuses expériences tentent de trouver des particules, ou des astres, qui pourraient la constituer. En vain jusqu'à présent, même si quelques candidats sont encore à l'étude. C'est ennuyeux, car la matière noire est très loin d'être marginale : elle compte pour 84 % du total de la matière contenue dans l'Univers. La recherche de la matière noire se poursuit mais certains cosmologistes s'interrogent : et si l'erreur venait plutôt des équations de d'Isaac Newton et d'Albert Einstein ?

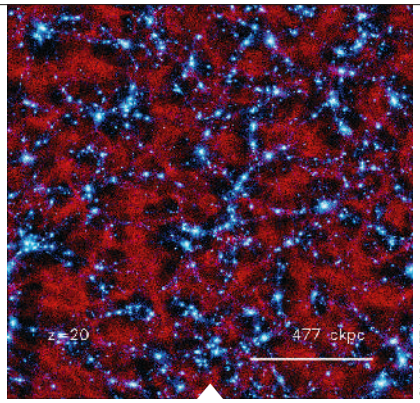
Le succès de la théorie MOND

En 1983, le physicien israélien Mordehai Milgrom ose s'attaquer de front à Isaac Newton. Pour résoudre le problème de la rotation trop rapide des étoiles dans les galaxies, il propose de modifier la seconde loi de Newton, qui relie l'accélération d'un corps à la somme des forces qui s'exercent sur lui. Dans le cas où la force en question est la gravitation, l'accélération d'un objet décroît en fonction du carré de la distance (en $1/r^2$). Mais pour Mordehai Milgrom, les équations de Newton ne sont plus valables lorsque

les accélérations deviennent très faibles. Il introduit alors une subtile modification des équations : l'accélération décroît en 1/r et non 1/r². Il crée ainsi la théorie MOND. « *Dans le détail, c'est une simplification excessive. MOND peut être vue soit comme une modification de la gravité (la force devient plus forte), soit comme une modification de l'inertie (les particules sont plus faciles à propulser),* explique Stacy McGaugh de l'université Case Western Reserve (États-Unis). *En fait, elle révèle des problèmes profonds concernant la nature de la masse ainsi que la gravité.* » En tous les cas, ce simple changement permet de retrouver la vitesse de rotation des étoiles et du gaz au sein de toutes les galaxies… sans recourir à la matière noire ! Par ailleurs, elle fait quelques prédictions qui ont justement été vérifiées en 2021 par l'équipe de Stacy McGaugh. Selon MOND, les étoiles ne sont pas seulement sensibles au champ gravitationnel de la galaxie, mais à celui de toutes les galaxies de leur environnement. C'est ce que l'on appelle « l'effet de champ externe » que Benoît Famaey, spécialiste de la théorie MOND à l'Observatoire astronomique de Strasbourg, résume ainsi : « *Sous l'effet des autres galaxies, la modification de Milgrom finit par s'effacer lorsqu'on s'éloigne trop du centre de la galaxie que l'on étudie. Concrètement, si l'on représente la vitesse de rotation des étoiles et du gaz en fonction de la distance au centre d'une galaxie comme notre Voie lactée, elle augmente d'abord (c'est Newton), puis elle atteint un plateau sous l'effet de la modification de Milgrom, enfin elle redescend sous l'effet des autres galaxies.* »

Des résultats qui aboutissent à un demi-succès

En janvier 2021, l'équipe de Stacy McGaugh a ainsi publié un article décrivant l'observation de cet effet sur 153 galaxies. Résultat confirmé dans un second article signé par la même équipe dans *Astrophysical Journal* en septembre 2021. Un beau succès pour



CHARDIN ET AL.

Simulation d'une tranche d'Univers selon le modèle de Dirac-Milne. La matière des galaxies est en bleu, l'antimatière en rouge et les zones de vide entre les deux en noir.

MOND, d'autant que cet effet n'est pas prévu par la matière noire… Avec cette théorie, il semblerait donc possible de s'en passer à l'échelle des galaxies.
L'annonce est si enthousiasmante qu'elle provoque des réactions parmi les spécialistes de MOND, dont Benoît Famaey et ses collègues strasbourgeois. « *À la suite de la publication de Stacy McGaugh, nous avons cherché cet effet où il devait être encore plus flagrant : dans une douzaine de galaxies ultra-diffuses* [de densité très basse] *placées dans un amas de galaxies où le champ gravitationnel est beaucoup plus important que celui à l'intérieur de ces galaxies.* » Il sera dit toutefois que rien n'est simple dans la gravitation… « *À notre grande surprise, nous n'avons pas observé d'effet de champ externe,* se désole Benoît Famaey. *En revanche, les étoiles suivent très bien la théorie MOND à l'intérieur de la galaxie, comme si elles n'étaient pas dans l'amas : nous avons retrouvé le plateau de Milgrom. C'est donc malgré tout un demi-succès pour la théorie MOND.* »

MOND est donc plus que jamais d'actualité, même si elle possède des lacunes. La première d'entre elles, selon Cédric Deffayet, c'est de n'avoir pas son équivalent relativiste. « *MOND est une modification de la théorie de Newton. Mais on attend toujours une bonne version relativiste de la théorie, autrement dit un MOND correspondant aux vitesses élevées.* » Justement ! En octobre 2021, les cosmologistes tchèques Constantinos Skordis et Tom Złosnik ont publié dans *Physical Review Letters* une version relativiste de MOND. Bien que la revue soit de référence, la prudence reste de mise et l'on attend une validation par l'ensemble de communauté.
MOND pose un autre problème majeur, selon le cosmologiste Gabriel Chardin, du CNRS. « *C'est une intuition géniale. Mais ce n'est pas une théorie, juste un paramétrage. Quel concept peut-on mettre derrière cette modification des équations de Newton, pour la justifier ?* » En effet, jouer avec les équations n'engendre pas une théorie nouvelle. Mais le cosmologiste propose une solution…

Antigravité et masse négative

Au cours de sa carrière, Gabriel Chardin a longtemps cherché la matière noire. Il a dirigé notamment au CEA l'expérience Edelweiss, à l'orée des années 2000. Elle traquait ceux qui étaient alors considérés comme les meilleurs candidats à la matière noire, les Wimps. Elle se poursuit encore aujourd'hui, hélas sans résultat probant. Mais ce n'est pas seu-

RÉMY CORTIN

« MOND est une intuition géniale. Mais ce n'est pas une théorie, juste un paramétrage »

Gabriel Chardin, cosmologiste au CNRS

lement cette déception qui a fait douter le chercheur de l'existence même de la matière noire. « *J'ai commencé à me méfier de cette notion dès 2000, lorsque s'est confirmé le concept d'énergie noire…* »
L'énergie noire est la grande découverte de la fin des années 1990. Jusqu'alors, on imaginait que l'Univers, en expansion depuis le Big Bang, allait peu à peu ralentir. Et pour cause : la seule interaction s'exerçant sur de grandes distances est la gravitation, attractive. Mais en 1998, les astrophysiciens américains Saul Perlmutter, Adam Riess et Brian Schmidt font une découverte surprenante, qui leur valut le prix Nobel de physique en 2011. En utilisant des explosions d'étoiles comme jalons dans le cosmos, ils montrent que non seulement l'expansion de l'Univers ne décroît pas, mais qu'au contraire elle accélère !
Pour expliquer ce résultat inattendu, ils font appel au concept d'énergie noire, dont — comme la matière noire — on ne sait rien, si ce n'est que son action est répulsive et contrebalance la gravitation. Même la relativité générale, qui peut rendre compte de ce comportement si l'on ajoute dans ses équations une « constante cosmologique », ne dit rien sur sa nature. Encore un mystère, et de taille, qui s'ajoute à celui de la matière noire. Or, elles représentent à elles deux 95% de la densité (quantité d'énergie par unité de volume) de l'Univers ! « *Toutes ces inconnues, cela devenait franchement inélégant* », soupire Gabriel Chardin.

Un modèle pour expliquer matière noire et énergie noire

Pour sortir de cette impasse, il propose, avec d'autres physiciens comme Aurélien Benoit-Lévy, un modèle dit de Dirac-Milne (car inspiré des travaux de Paul Dirac et d'Edward Milne) capable d'expliquer à la fois la matière noire et l'énergie noire. Il repose sur l'antimatière, qui est en quelque sorte l'image de la matière dans un miroir qui inverserait certaines de ses propriétés. L'antiproton par exemple, possède la même masse que le proton. En revanche, sa charge électrique est inversée. Théoriquement, le Big Bang a fabriqué autant de matière que d'antimatière. Mais cette dernière semble avoir presque totalement disparu, sans que l'on sache pourquoi. Encore un mystère ! On ne connaît pas d'étoiles, ou de planètes, faites d'antimatière. Certes, de fugaces antiparticules traversent l'atmosphère. Et il est aussi possible d'en fabriquer au compte-goutte dans les collisionneurs. Donc pour les physiciens, elle existe, mais jamais longtemps : sitôt qu'elle ▸

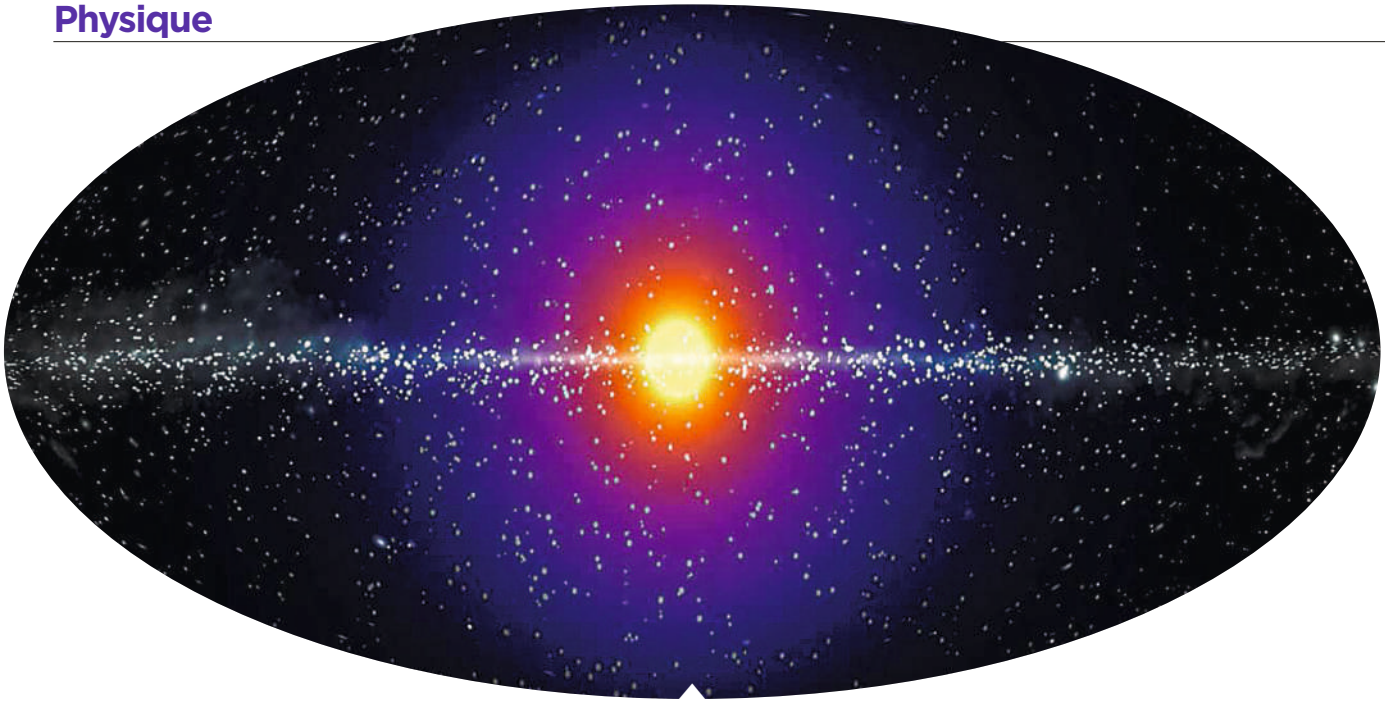
EXPÉRIENCE

Alpha-g : comment la gravitation agit-elle sur l'antimatière ?

MAXIMILIEN BRICE, JM. ORDAN/CERN

Mise au point de l'expérience Alpha-g au Cern, à Genève (Suisse). Antiprotons et positrons circulent dans ce tube.

L'antimatière lâchée dans le vide tombe-t-elle comme la matière ? Ou bien part-elle vers le haut, comme le prévoient certaines théories ? L'expérience Alpha-g, au Cern, à Genève, tentera de répondre à cette question en observant la chute libre d'antiatomes d'hydrogène, composés d'un antiproton et d'un positron, l'antiparticule de l'électron.
La simplicité de l'expérience cache une exécution complexe, notamment parce que l'antimatière ne doit jamais rencontrer la matière, sous peine d'annihilation immédiate. Il faut d'abord fabriquer les antiprotons, et les faire rencontrer des positrons, issus de la désintégration radioactive d'un isotope du sodium. Une fois l'anti-atome constitué, il est isolé dans un champ magnétique, puis freiné afin de pouvoir mesurer avec précision ses mouvements sous l'effet de la gravitation. Cette phase de freinage a été testée et réussie en mars 2021 grâce à des lasers qui, absorbés puis réémis par l'antiatome, le ralentissent. Les premières mesures auront lieu en ce début d'année, pour des résultats espérés avant la fin du premier semestre.



La matière noire pourrait émettre un halo de rayons X autour du centre de la galaxie. Elle reste pourtant invisible à ce jour.

© DESSERT N.L. RODD, B.R. SAFDI, Z. ROSTOMIAN (BERKELEY LAB)

rencontre de la matière, elle s'annihile en libérant de l'énergie.

Pour les partisans du modèle de Dirac-Milne, l'antimatière est pourtant la solution. Elle serait bien aussi foisonnante que la matière. Mais elle la fuit. Pourquoi ? Parce qu'ils supposent qu'elle possède une masse négative, et se trouve soumise à une antigravité. Il y a ainsi répulsion entre matière et antimatière, mais aussi entre antimatière et antimatière. Elle ne peut donc pas constituer d'astres, puisque les antiatomes se repoussent… Mais surtout, cette action répulsive correspond aux caractéristiques de l'énergie noire !

Par ailleurs, en nourrissant leurs modèles d'Univers avec de la matière et de l'antimatière à parts égales, les chercheurs ont pu constater qu'ils parvenaient à retrouver un cosmos qui ne contredit pas les observations, pour le moment. « *Dans nos simulations, la matière de masse positive s'effondre bien sur elle-même et forme des structures comme des galaxies,* détaille Gabriel Chardin. *L'antimatière s'étend comme elle peut car elle est repoussée par tout le monde, y compris elle-même. Elle s'accumule autour des galaxies en forme de structure de boîte à œufs, car il y a entre les galaxies et l'antimatière d'immenses bulles de vide dues au fait que les deux se repoussent.* » Plus besoin d'énergie noire, donc, et depuis une nouvelle publication en août 2021 dans *Astronomy & Astrophysics*, il n'y a plus besoin non plus de matière noire ! « *Les structures que prévoient nos modèles, avec une galaxie entourée d'une bulle de vide presque totale, permettent de reproduire les courbes de rotation plates des galaxies avec la forme prédite par MOND ! Cela a été une surprise totale pour nous.* » Ainsi, la modification des équations de Newton trouverait leur justification dans la présence massive d'antimatière dans l'Univers.

Il faudra bien un jour dépasser Einstein

Pour valider cette théorie audacieuse, qui contredit au passage un principe fondamental de la relativité générale (l'égalité entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle), Gabriel Chardin attend beaucoup des expériences Alpha-g *(lire l'encadré p. 37)*, Gbar et AEgIS qui devraient commencer à produire des données au début de cette année au Cern. Elles étudient précisément le comportement de l'antimatière soumise à la gravité. En attendant, cette tentative est suivie avec intérêt et circonspection par les partisans de MOND. Ainsi, pour Benoît Famaey, « *cette ligne de recherche est particulièrement intéressante et mérite d'être poursuivie, même si, à ce stade, dire que ce formalisme permet de reproduire MOND me paraît un peu prématuré* ».

De l'aveu même de Gabriel Chardin, le modèle de Dirac-Milne ne suscite pas beaucoup de commentaires pour le moment. Mais il faut du temps pour qu'une théorie fasse son chemin. Sans compter que la relativité générale est robuste. « *Les prédictions d'Albert Einstein sont régulièrement vérifiées dans l'Univers, avec une très grande précision. Aussi, chez les cosmologistes, il n'y a pas de consensus pour dire que la relativité générale sera un jour dépassée même si je trouve l'idée intéressante,* estime Cédric Deffayet. *En revanche, si l'on veut décrire ce qui se passe au cœur d'un trou noir, ou lors du Big Bang, c'est une autre histoire. Les équations atteignent leurs limites et il faudra bien dépasser Einstein…* » Que ce soit par l'infiniment petit ou l'infiniment grand, l'édification de la plus fascinante théorie de la physique se poursuit… ■

F. N. @fnicot07

L'insaisissable constante de Newton

Les laboratoires de métrologie s'efforcent de mesurer avec davantage de précision la constante gravitationnelle. Avec comme objectif de découvrir peut-être une nouvelle physique.

Le problème demeure insoluble depuis plus de trente ans. Et rend littéralement fous les physiciens. Il concerne la constante gravitationnelle, appelée aussi constante de Newton et désignée comme « le grand G ». Une grandeur ô combien fondamentale puisqu'elle permet de calculer l'intensité de la force qui fait tomber les pommes, valser les planètes ou s'effondrer les étoiles. On la retrouve dans toutes les théories de la gravitation : la loi de l'attraction universelle de Newton comme la relativité générale d'Einstein et ses possibles alternatives comme la théorie MOND *(lire p. 35)*. *« Or cette constante de la nature est la plus mal connue de toutes »*, concède Jean-Louis Vigneresse, géophysicien à l'université de Lorraine. Alors que les autres constantes comme la masse de l'électron ou la constante de structure fine qui régit la force électromagnétique sont mesurées avec une incertitude (ou barre d'erreur) à 6, 8 voire 10 chiffres après la virgule, G ne l'est qu'avec 4 décimales, soit 0,0015 %. Pire : les mesures sont très dispersées. L'écart entre les plus hautes et les plus basses valeurs de G dépasse 0,05 %, soit beaucoup plus que les incertitudes de mesure elles-mêmes ! Comment savoir, dès lors, quelle est la bonne valeur ? *« La situation est très embarrassante,* admet Stephan Schlamminger, physicien à l'Institut américain des normes et de la technologie (NIST), basé à Gaithersburg dans le Maryland (États-Unis). *Soit les protocoles expérimentaux ne sont pas suffisamment maîtrisés, soit il y a quelque chose que nous ne comprenons pas encore sur la gravitation.* » De nouveaux résultats, dont les premiers sont attendus au printemps de cette année, permettront peut-être d'y voir plus clair. Et comprendre, enfin, ce qui ne tourne pas rond avec G.

0,0015 %
La marge d'erreur de la constante G, bien plus élevée que celle d'autres constantes.

L'imbroglio s'explique d'abord par la complexité de la tâche. Et par la nature même de la gravitation. Selon la fameuse loi formulée au XVIIe siècle par Isaac Newton, il existe une force qui attire deux corps quels qu'ils soient et celle-ci est proportionnelle à G multiplié par le produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Or, parmi les quatre interactions fondamentales de la physique — gravitation, électromagnétisme, forces nucléaires forte et faible —, c'est celle qui est la moins intense. De très loin. L'attraction entre deux masses de 1 kg, distantes de 1 mètre, équivaut ainsi au poids de quelques cellules biologiques. Un aimant fixé sur un réfrigérateur permet encore plus facilement de s'en rendre compte. *« Toute l'attraction gravitationnelle de notre planète s'exerce sur ce petit objet,* rappelle Jean-Louis Vigneresse. *Or il ne tombe pas, parce que la force électromagnétique qu'il produit la surpasse sans difficulté.* » Même si la gravitation régente l'orbite des planètes

RICHARD DAVIS

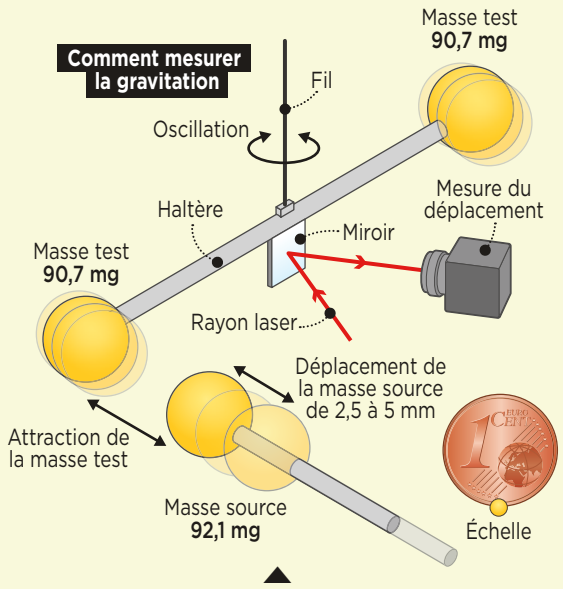
« Pour mesurer cette constante, nous n'avons d'autre possibilité que d'utiliser la loi de Newton »

Richard Davis, physicien honoraire au Bureau international des poids et mesures (BIPM) à Sèvres (Hauts-de-Seine)

EXPÉRIENCE

La plus petite force gravitationnelle mesurée

Elle mesure 900 millionièmes de millionième de newton… Une force ridiculement petite ! Qui, pour fixer les idées, est 30 milliards de fois plus faible que l'attraction gravitationnelle de notre planète. Or en mars 2021, Markus Aspelmeyer et son équipe de l'université de Vienne (Autriche) ont mesuré cette minuscule attraction. Un record ! Ils ont utilisé une balance de torsion miniaturisée à l'extrême. Elle est constituée d'une barre horizontale suspendue à un fil, avec deux billes d'or de 90,7 milligrammes à chaque extrémité. Une troisième bille, de 92,1 milligrammes, est rapprochée de l'une d'elles, à des distances comprises entre 2,5 et 5 millimètres. Ce déplacement modifie l'attraction entre les sphères et fait pivoter le fil de torsion selon un angle déterminé à l'aide d'un laser. Mais les physiciens autrichiens pourraient faire encore mieux. *« Les expériences que nous préparons, dans une mine souterraine près de Vienne afin de supprimer les perturbations sismiques, permettront d'utiliser des objets d'une masse inférieure à la masse de Planck, soit 22 millionièmes de gramme »*, annonce Markus Aspelmeyer.



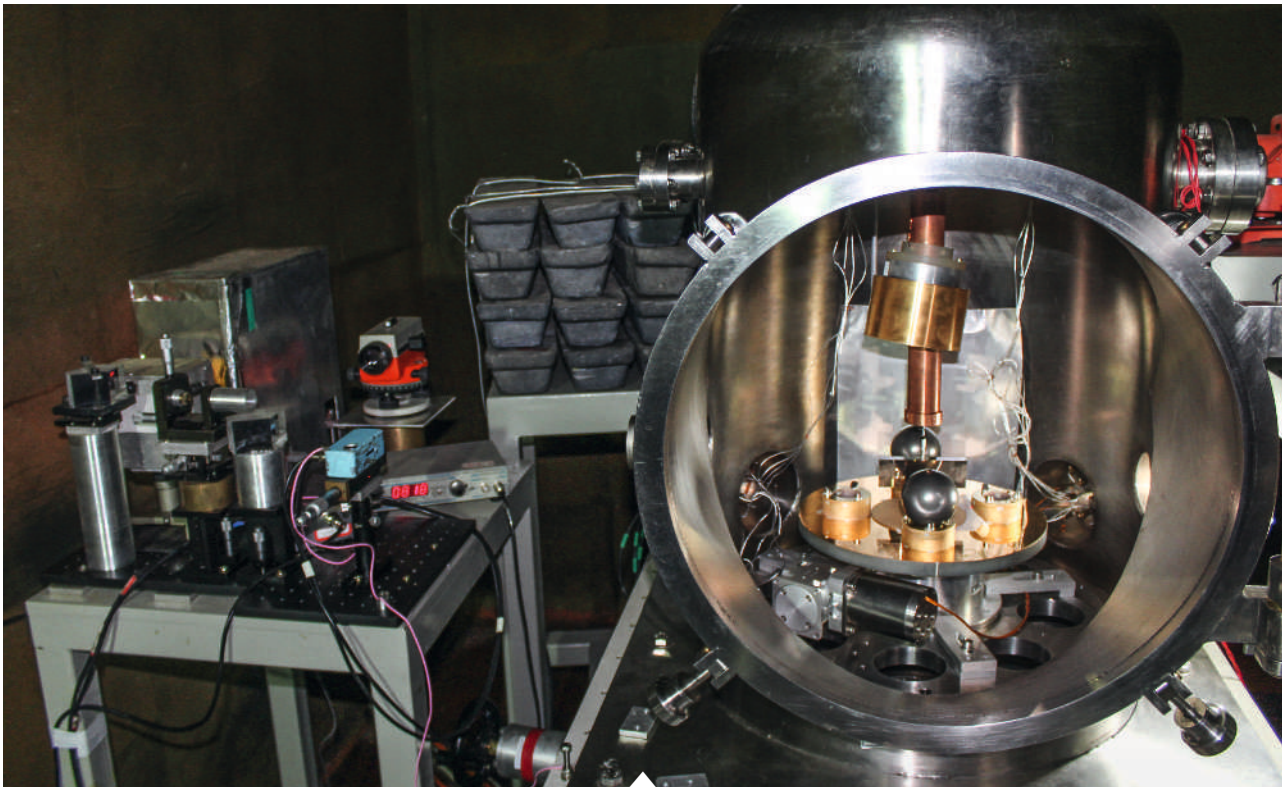
Cette balance de torsion mesure des forces gravitationnelles entre des objets d'une masse inférieure à 100 milligrammes.

Ces travaux ouvrent ainsi de *« nouvelles possibilités pour mesurer la constante gravitationnelle à de très petites échelles,* se réjouit le chercheur. *Et tester la loi de Newton pour des masses et à des distances beaucoup plus petites que ce qui est possible actuellement.* »

BRUNO BOURGEOIS

et structure l'Univers sur des distances vertigineuses, elle est ainsi très difficile à caractériser à de petites échelles en laboratoire. Aucune sorte d'écran ne peut en outre lui faire barrage. Résultat : les dispositifs de mesure « ressentent » toutes les masses environnantes. Celles des immeubles, des montagnes, d'éventuelles rivières souterraines… et même des expérimentateurs ! Sans oublier la plus importante d'entre elles : la Terre. Autant de contributions qui doivent impérativement être prises en compte. Une troisième difficulté, enfin, tient dans le fait qu'aucune théorie ne relie G à d'autres constantes de physique — contrairement à la constante de structure fine, par exemple, raccordée à la masse de l'électron et à la constante de Planck (essentielle en mécanique quantique) et qui peut de cette façon être calculée. *« Pour mesurer la constante gravitationnelle, nous n'avons d'autre possibilité que d'utiliser la loi de Newton »*, signale ainsi Richard Davis, physicien honoraire au Bureau international des poids et mesures (BIPM) situé à Sèvres (Hauts-de-Seine).

Dans le cadre de ses travaux visant à déterminer la densité et la masse de la Terre, le Britannique Henry Cavendish a été le premier, en 1798, à produire un résultat. Il construisit une « balance de torsion » composée de deux boules de plomb de 730 grammes formant un haltère, suspendu à un fil de cuivre d'un mètre de long. Deux autres sphères, de 158 kg et donc beaucoup plus massives, ont été rapprochées à 22,5 cm de celles-ci par un système de poulies. En attirant vers elles les petites masses, elles faisaient pivoter la balance dans le plan horizontal. *« On sépare alors cette force de l'attraction de notre planète, qui s'exerce, elle, dans le plan vertical »*, relève Jean-Louis Vigneresse. En mesurant l'angle de torsion à l'aide d'un miroir et d'un faisceau lumineux, Cavendish détermina ainsi son intensité. Et donc aussi G, les autres paramètres (masses, distances, etc.) étant



G. CHAO XUE / UNIVERSITÉ SUN YAT-SEN

Des scientifiques chinois ont utilisé cette balance de torsion en 2018 pour mesurer la constante gravitationnelle. Leurs résultats affichent la plus faible marge d'erreur connue à ce jour.

connus. Selon le système d'unités mis en place ultérieurement, sa valeur correspondait à $6{,}67 \times 10^{-11}$ mètres cubes par kilogramme et seconde au carré. Avec une incertitude d'environ 1 %, soit 10 000 parties par million (ppm).

Une liste potentiellement très longue de sources d'erreurs

« Toutes les expériences qui seront réalisées par la suite s'inspireront peu ou prou de la balance de Cavendish », indique Terry Quinn, directeur honoraire du BIPM qui a consacré près de trente ans aux mesures de G. Et il faudra attendre le milieu du XX^{e} siècle pour enregistrer les premières avancées significatives grâce à une version améliorée. Développée par le physicien et inventeur américain Paul Heyl, elle exploite les oscillations d'un pendule pour convertir et mesurer plus précisément les minuscules forces gravitationnelles. La valeur de G est fixée alors à $6{,}6720 \times 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2} avec une incertitude de 615 parties par million. Dans les années 1980, ce même type de technique (dite du « temps d'oscillation ») réduit l'incertitude à 128 parties par million. Mais la progression est stoppée net la décennie suivante. Neuf mesures indépendantes produisent alors des valeurs très différentes de G, qui se démarquent aussi des résultats précédents ! Le Comité de données pour la science et la technologie (Codata), organisme qui préconise les valeurs pour toutes les constantes de la physique, en prend acte. Et réévalue l'incertitude, en 1998, à 1500 parties par million !

« Les expérimentateurs ont dû reconsidérer leurs calculs, raconte Richard Davis, *avec l'objectif de débusquer toutes les sources d'erreurs qui pourraient perturber et fausser les résultats.* » Une liste potentiellement très longue : problèmes d'homogénéité des masses, charges électrostatiques à la surface de celles-ci, vibrations sismiques, variations de la densité de l'air, structure et composition des fils de torsion, etc. *« Ces expériences sont aussi fascinantes que complexes. Il y a tellement de phénomènes qui peuvent intervenir ! Quand on s'engage là-dedans, il est très difficile de lâcher. C'est quasiment pour la vie »*, plaisante à peine Terry Quinn, qui a réalisé avec d'autres physiciens, dont Richard Davis, deux séries de mesures en 2001 et 2014 au BIPM. L'une des particularités de leur balance est qu'elle utilise un ruban de 30 micromètres d'épaisseur, et non un fil, comme élément de suspension. L'incertitude obtenue est alors très faible : seulement 24 parties

par million. Et les résultats obtenus en 2001 et 2014 coïncident ! Mais la valeur de G ($6{,}67554 \times 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2}) *« diverge beaucoup trop de toutes les autres expériences »*, reconnaît Richard Davis, l'écart atteignant plusieurs centaines de parties par million.

Les résultats les plus récents — et aussi les plus précis — ont été publiés par des scientifiques chinois en 2018. Issus du Laboratoire de gravitation et de physique quantique à Wuhan, ils ont réalisé au même endroit et simultanément deux types d'expériences. La première est fondée sur la technique du temps d'oscillation, la seconde sur un autre type de balance où des masses de 1 et 8 kg mettent en mouvement non pas un fil ou un ruban mais une plaque de silicium de moins de 100 grammes.

Des paramètres expérimentaux encore incontrôlés

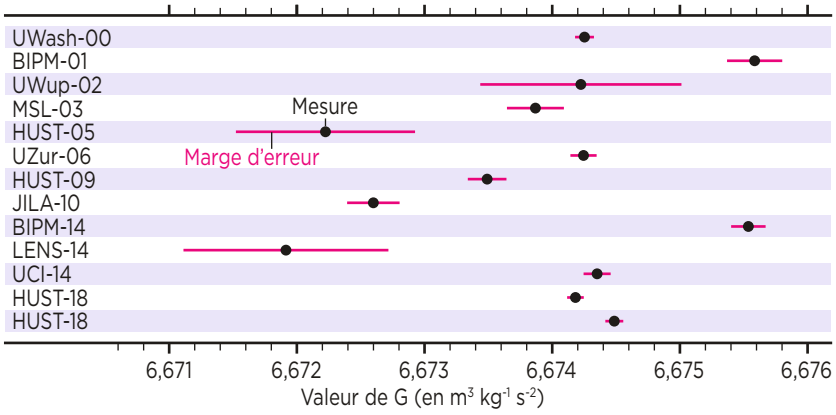
Composée d'une vingtaine de chercheurs, l'équipe travaille sur la mesure de G depuis les années 1980. Elle préparait ces nouvelles expériences depuis près de dix ans, traquant les plus infimes biais méthodologiques. *« C'est pour moi la meilleure de toutes les équipes. Ses compétences techniques et l'attention qu'elle a portée au moindre détail sont absolument incroyables »*, s'émerveille Stephan Schlamminger. L'incertitude obtenue par ses deux expériences est effectivement de 11,61 et 11,64 ppm. Un record ! Mais une fois de plus, les deux valeurs de G ($6{,}674184 \times 10^{-11}$ et $6{,}674484 \times 10^{-11}$) sont incompatibles puisqu'elles s'écartent de plus de 40 ppm, soit trois fois plus que les barres d'erreur…

En 2020, cette équipe a également décortiqué les 13 meilleures expériences réalisées dans le monde ces vingt dernières années, pointant un écart « inacceptable » de 550 ppm. *« Il est impossible, dans ces conditions, d'affirmer que nous possédons une valeur à haute précision de la constante gravitationnelle,* déplore Shan-Qing Yang, un des membres du groupe. *Seuls des résultats identiques produits par des méthodes indépendantes pourront en garantir la robustesse. »* Comment expliquer de telles divergences ? Et espérer sortir de l'impasse ? L'hypothèse la plus vraisemblable est que, malgré un travail de fourmi et des décennies de recherches, certains paramètres expérimentaux ne seraient pas encore suffisamment contrôlés. Ni même identifiés. *« Il y a tellement de facteurs qui pourraient influencer les mesures vis-à-vis d'une force aussi faible. Or, nous ne pouvons pas prendre en considération, dans nos calculs, ce que nous n'imaginons pas encore »*, concède Shan-Qing Yang.

Une autre possibilité, moins probable mais beaucoup plus excitante, fait intervenir un nouveau mécanisme physique. *« Comme l'existence d'une cinquième force,* spécule Terry Quinn, *qui imprimerait ses effets à des échelles extrêmement réduites »*. Il se pourrait, également, que la constante gravitationnelle n'en soit finalement pas une. Et varie dans l'espace ou dans le temps. *« C'est ce que prévoient certaines variantes de la théorie MOND,* rappelle Aurélien Hees, chercheur à l'observatoire de Paris. *Mais également la théorie des cordes, qui vise à unifier les quatre interactions de la physique. »* *(Lire l'encadré p. 43.)*

Une valeur robuste, convergente et plus précise de G permettrait, de manière générale, de tester plus finement un ensemble de prédictions théoriques. Et d'examiner, en particulier, comment la gravitation se comporte à de très faibles distances et pour des masses encore plus infimes *(lire l'encadré p. 40)*. *« On ne sait jamais ce qu'on peut découvrir avec des mesures plus précises,* insiste Terry Quinn. *C'est, par définition, de l'exploration pure, une* Terra incognita. » Une valeur mieux déterminée de la constante gravitationnelle bénéficierait, enfin, à de nombreux

Les errances des mesures de la constante de gravitation G (de 2000 à 2018)



Ces 13 mesures de précision de la constante G réalisées depuis 2000 par les laboratoires (en ordonnée, leur sigle et l'année de la mesure) ne donnent pas les mêmes résultats.

BRUNO BOURGEOIS - SHAN-QING YANG ET AL., NATIONAL SCIENCE REVIEW, DÉC. 2020

> « Plus G sera connu avec exactitude, plus nous pourrons calculer avec précision la masse de la Terre et d'autres planètes »
>
> **Shan-Qing Yang,** chercheur au Laboratoire de gravitation et de physique quantique à Wuhan (Chine)

calculs en astronomie et en géophysique. « *Plus G sera connu avec exactitude, plus nous pourrons calculer avec précision la masse de la Terre,* signale Shan-Qing Yang. *Ce qui est vrai aussi pour les autres planètes, du Système solaire comme d'ailleurs.* »
Autant d'enjeux qui encouragent les chercheurs à poursuivre cette quête. Ceux de Wuhan préparent ainsi de nouveaux résultats pour la fin 2022 ou 2023. Ils peaufinent donc encore leurs incroyables machines, se concentrant désormais « *sur de possibles effets liés aux propriétés mécaniques des éléments de torsion* », confie Shan-Qing Yang.

Aller jusque dans l'espace pour mesurer G

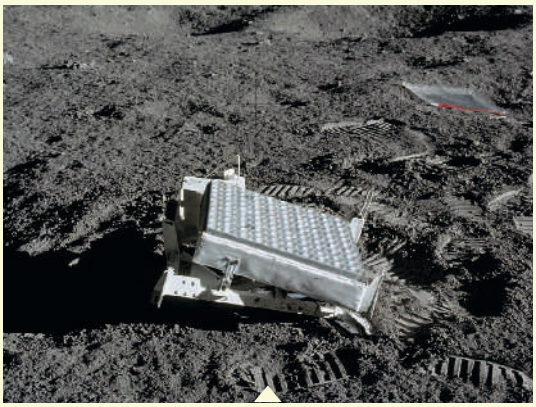
Lancé en 2019, un projet conduit par le physicien Brian D'Urso, de l'université du Montana (États-Unis) — en collaboration avec le Jet Propulsion Laboratory de la Nasa — envisage une nouvelle approche : mesurer, dans l'espace, des forces gravitationnelles induites par les mouvements de microsphères en silicium. Intégré dans un nanosatellite de 4 kg et propulsé en orbite basse, le dispositif permettrait de mesurer G avec « *une précision de 1 ppm voire moins* », estime Brian D'Urso dans une publication récente, les conditions de l'espace permettant de « *réduire les erreurs causées* [sur Terre] *par les sources gravitationnelles environnantes* ». Si le projet se concrétise, rien ne se fera toutefois avant plusieurs années.
Mais la prochaine valeur de G devrait être communiquée à beaucoup plus brève échéance. « *En avril prochain, à New York, lors d'une réunion de la Société américaine de physique* », espère Stephan Schlamminger. Le BIPM lui a en effet transmis sa balance afin qu'une équipe indépendante reproduise les mesures et identifie peut-être certains biais expérimentaux, dits « de confirmation » notamment. Depuis 2020, au NIST, il réalise ainsi des analyses « à l'aveugle »… sans connaître la valeur des masses utilisées dans le dispositif ! « *Les résultats ne pourront donc pas être subtilement influencés par les données antérieures* », argumente Stephan Schlamminger, persuadé que le problème sur la convergence de G sera un jour résolu grâce à l'opiniâtreté des expérimentateurs. « *Si je consacre autant de temps et d'énergie à ces recherches, c'est parce que je suis convaincu que G est une grandeur mesurable et que l'objectif n'est pas impossible à atteindre,* affirme-t-il. *Et que ce que nous pourrions découvrir avec une balance de torsion pourrait, peut-être, expliquer l'Univers. Ce serait un rêve.* » ■

F. D. @fdaninos

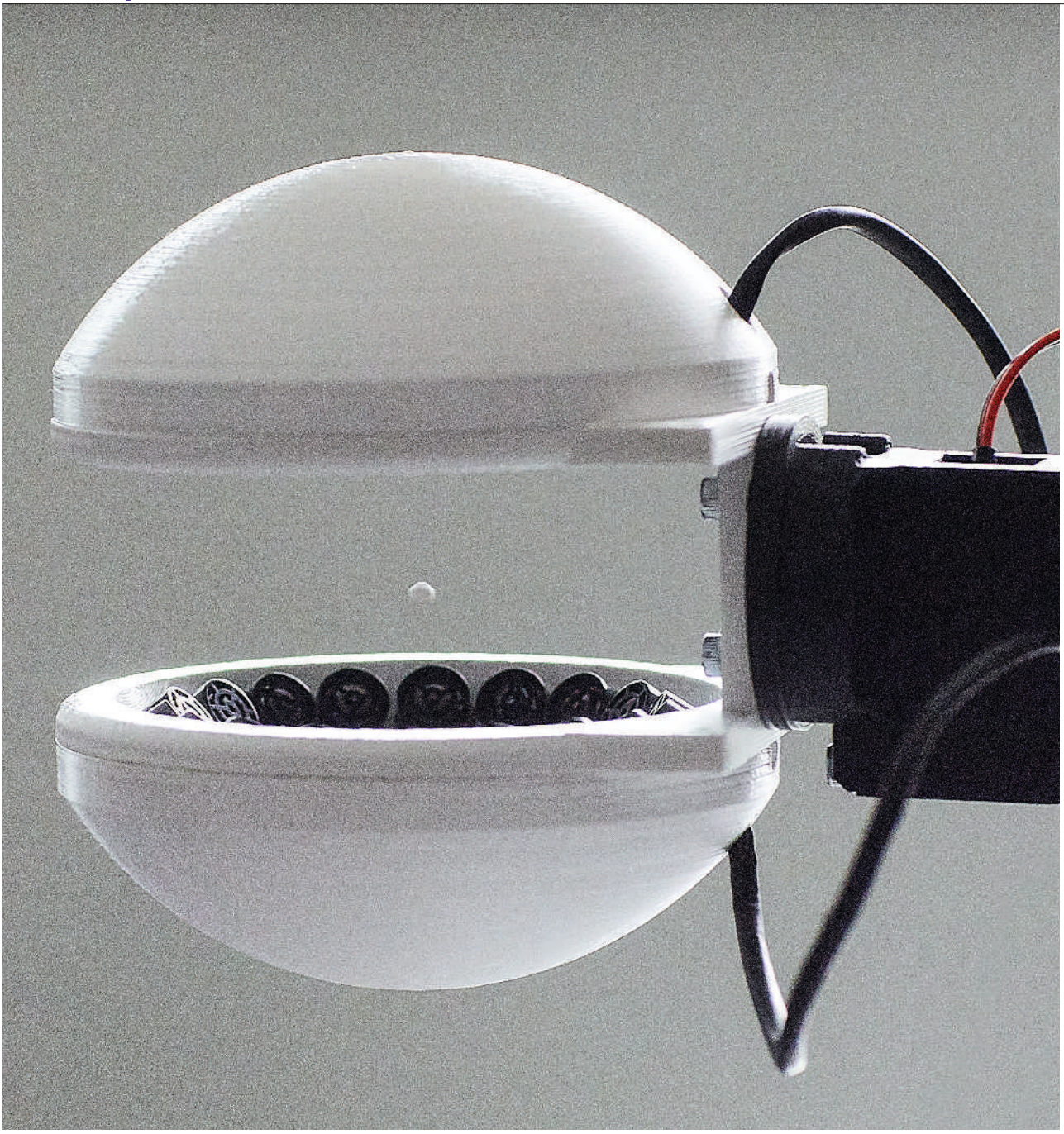
NOUVELLES THÉORIES

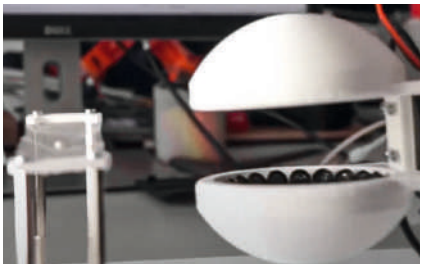
Une constante qui pourrait varier

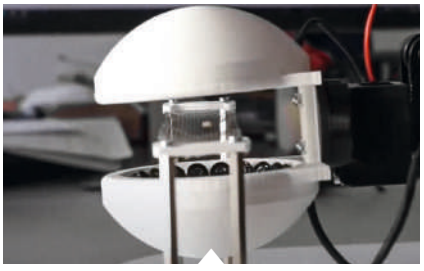
Pour la relativité générale d'Einstein comme pour la loi de l'attraction universelle de Newton, la constante gravitationnelle G possède une valeur fixe, invariable. « *Elle doit rester rigoureusement la même au cours du temps et dans tous les référentiels* », pose Aurélien Hees, de l'observatoire de Paris. Mais ce postulat s'effondre dans les théories qui cherchent à dépasser Einstein, comme MOND par exemple ou la théorie des cordes qui vise à unifier la relativité générale et la mécanique quantique. « *Dès qu'on modifie la relativité générale, on introduit de nouveaux champs qui font automatiquement varier G,* note le chercheur. *Prouver que G n'est pas fixe constituerait un argument très fort en faveur d'une nouvelle physique.* » Les tests les plus solides à ce jour exploitent la demi-douzaine de réflecteurs déposés entre 1969 et 1973 sur la Lune. Grâce à des impulsions laser dirigées vers ces systèmes optiques, les scientifiques reconstruisent la dynamique orbitale de notre compagnon céleste, à l'échelle du centimètre. « *Une variation temporelle de G modifierait les forces gravitationnelles entre la Terre et la Lune, et donc la trajectoire de celle-ci* », explique Aurélien Hees. Mais aucune anomalie n'a été détectée ces cinquante dernières années. Et selon les plus récents résultats publiés en février 2021, G n'aurait connu aucune variation sur une période d'un an, à un millionième de milliardième près.


NASA

Des réflecteurs comme celui-ci, posés sur la Lune il y a 50 ans, sont utilisés pour tester la variation de G.







NO-TOUCH ROBOTICS

Cette main robotisée peut saisir une particule posée sur un support et la « tenir » sans contact, uniquement par la pression d'ondes acoustiques (projet du chercheur Marcel Schuck de l'École polytechnique fédérale de Zurich, Suisse).

Ondes sonores

Elles font léviter les objets

Manipuler un objet sans le toucher : c'est la promesse d'ondes acoustiques qui créent une poussée verticale capable de contrecarrer la gravité. Un exploit fascinant réalisé en laboratoire qui ouvre la voie à une chirurgie sans contact pour déplacer, par exemple, des calculs rénaux sans opérer.

Par Arnaud Devillard @A_Devila

Et pourtant elle flotte ! Sans aucun contact, figée entre les deux pinces d'un robot, une petite bille défie la gravité. Comment ce bras articulé dont la main se compose de deux hémisphères maintient-il l'objet sans se refermer dessus ? L'exploit est le fruit du projet d'un chercheur de l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse), Marcel Schuck, qui a donné naissance à la start-up No-Touch Robotics. Littéralement, la « robotique sans contact ». Le secret : le toucher est remplacé par du son. Ou, plus rigoureusement, par des ondes acoustiques. Dans les pinces du robot, une série de petits transducteurs, dispositifs qui envoient deux champs acoustiques de pression équivalente mais dans des directions opposées. Ainsi, pris entre les deux, le petit objet se retrouve en suspension. Que le robot déplace sa main ou la fasse pivoter, la pression continue de faire son effet.

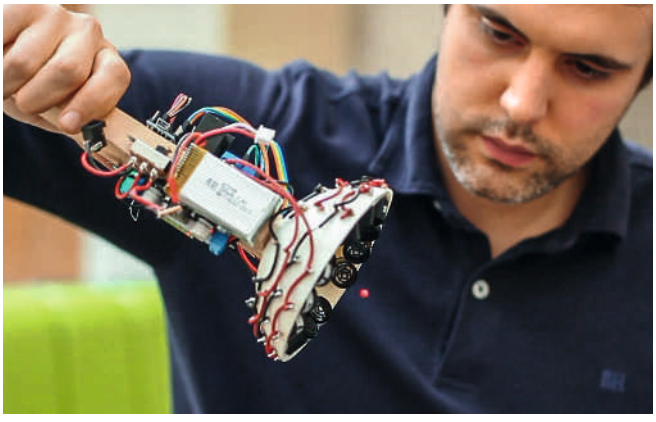
À l'origine de ce phénomène : le principe de la lévitation acoustique, connu depuis les années 1930 *(lire l'encadré p. 47)*. Il consiste à créer, par des ondes sonores, une poussée verticale capable de contrecarrer la gravité, avec une force qui n'est ni inférieure à celle-ci — sinon l'objet retombe ou ne décolle pas —, ni supérieure — sinon il est expulsé. « *La nouveauté, c'est la miniaturisation qui conduit à des ondes stationnaires à des échelles beaucoup plus petites* », note Michael Baudoin, chercheur à l'université de Lille. Aujourd'hui, ce principe se voit ainsi intégré dans des systèmes robotisés, laissant envisager des usages industriels, pour assembler et manipuler en toute sécurité des objets fragiles (microcircuits, composants en micromécanique) qu'un robot classique risquerait d'endommager. Autre application : l'observation. Une particule en lévitation peut être scrutée sous tous les angles, à l'œil nu, avec une

lentille grossissante voire une caméra, sans les inconvénients des lamelles de verre utilisées avec un microscope.
La lévitation peut aussi être obtenue en n'utilisant qu'une seule moitié du dispositif. Celle-ci envoie alors une onde qui est renvoyée par une surface. « *On obtient une onde réfléchie et la superposition des deux ondes crée ce que l'on appelle une onde stationnaire. Elle se caractérise par des endroits de l'espace où le champ de pression est nul et d'autres où il oscille* », explique Thomas Brunet, de l'Institut de mécanique et d'ingénierie (université de Bordeaux/CNRS). Ce qui permet à une main robotique d'« attraper » un objet.

Une technique qui peut être appliquée aux cellules vivantes

Des chercheurs de l'université métropolitaine de Tokyo (Japon) ont ainsi présenté, en juillet 2021, une coupelle de 12 cm de diamètre équipée de transducteurs à ultrasons. Les ondes acoustiques sont dirigées sur une surface où se trouve une bille de polystyrène de 3 millimètres. L'opération génère un réseau d'ondes qui va permettre de piéger l'objet entre deux pressions contraires. Toute la difficulté résidait dans le fait de prendre en compte l'onde sonore réfléchie dans le calcul du champ d'onde émis. Une opération délicate : « *Nous ne réussissons pas à chaque fois à attraper l'objet. Quand nous déplaçons une particule, il arrive qu'elle nous échappe* », avouaient les chercheurs dans leur article.
Mais cette approche a une limite. Les ondes stationnaires ne sont pas sélectives : si plusieurs objets sont piégés, ils ne peuvent pas être manipulés indépendamment les uns des autres. Aussi, les scientifiques ont dû affiner leurs outils pour créer une véritable « pince acoustique », par analogie avec les pinces optiques obtenues par laser qui permettent de piéger un objet en 3D à partir d'un seul faisceau lumineux. Ainsi, en lieu et place d'une onde se propageant en ligne droite, ils ont réussi à déployer des vortex acoustiques, c'est-à-dire des ondes sonores tournant autour d'un axe central. Elles s'obtiennent avec une série de transducteurs pilotés de façon indépendante. Le vortex crée un minimum de pression en son centre, qui maintient l'objet en place.
Cette technique fait preuve d'une telle finesse qu'elle permet d'envisager de manipuler des cellules vivantes. Dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut des nanosciences de Paris, le chercheur Michael Baudoin a adapté ce principe pour déplacer une à une des cellules de cancer du sein sous un microscope, formant avec elles… les lettres A et T. Pour ce faire, il les a d'abord déposées dans des micro-canaux reposant sur un bloc de verre. Celui-ci sert de milieu de propagation pour les vortex créés par des électrodes en forme de spirale. Ce projet, publié dans *Nature Communications* en août 2020, n'est qu'un début. « *On espère pouvoir exercer des forces dans le domaine du nanonewton, compatibles avec les forces cellulaires, et ce sans dommage,* ajoute Jean-Louis Thomas, de l'Institut des nanosciences de Paris et coauteur de l'étude. *Ces pinces acoustiques peuvent être utilisées sur des objets d'une large gamme de tailles.* »

UNIVERSITY OF BRISTOL



A. MARZO, B. DRINKWATER

Le piège acoustique du chercheur Asier Marzo consiste en deux spirales d'ondes acoustiques tournant dans le sens inverse l'une de l'autre. Elles se succèdent toutes les millisecondes.

LE + NUMÉRIQUE
Vortex acoustique et calculs rénaux : **sciav.fr/900calculs**
Pince acoustique et lentille d'élastomère : **sciav.fr/900pince**
Déplacer des cellules sous un microscope : **sciav.fr/900manip**

Les vortex ont pour autre intérêt de former un piège stable. Chercheur à l'université publique de Navarre (Espagne), Asier Marzo a ainsi conçu en 2018, dans le cadre d'un séjour à l'université de Bristol (Royaume-Uni), un appareil à faux airs de lampe torche garni de transducteurs émettant un vortex acoustique. La spirale change de sens toutes les millisecondes, empêchant une bille de polystyrène d'être éjectée sous l'effet de la rotation. L'instrument peut être pointé vers le haut et le bas, la bille restant comme accrochée par un lien invisible, défiant la pesanteur.

Extraire des calculs rénaux sans opérer

Se dessine aujourd'hui la possibilité d'acheminer avec du son des particules dans un corps vivant à des fins thérapeutiques, ce qui est impossible à faire avec la lévitation et les ondes stationnaires. Dans un article de juin 2020, les chercheurs Diego Baresch du CNRS et Valeria Garbin de l'université de technologie de Delft (Pays-Bas) ont travaillé *in vitro* sur une microbulle placée derrière une paroi imitant la texture de tissus humains. Le vortex acoustique a pu traverser l'obstacle pour attraper la microbulle. Quelques mois plus tard, une équipe de l'université de Washington, à Seattle (États-Unis), présentait la manipulation *in vivo* d'une bille de verre de 3 mm dans une vessie de porc, sans dommages collatéraux. L'idée de ce projet est de pouvoir extraire des calculs rénaux sans opérer. Voire, à terme, de contrôler d'autres objets dans un corps vivant, comme des mini-caméras.
Dans ce contexte, un projet de l'Institut de mécanique et d'ingénierie (université de Bordeaux/CNRS) propose de simplifier la manière de créer une pince acoustique. Il consiste à placer sur la source d'onde sonore, un échographe par exemple, une pièce d'élastomère. Cet élément fabriqué par impression 3D n'est pas homogène : il est divisé en plusieurs zones de densité différente *(lire l'encadré ci-dessus)*. *« L'onde arrive à plat sur la lentille et sort avec un retard imputable à la portion qu'elle va traverser,* détaille Thomas Brunet, coauteur de cette étude. *En créant un gradient de retard, on obtient un front d'onde hélicoïdal. »* Cette approche peu onéreuse a un énorme avantage : si on veut changer la focalisation de la pince acoustique, l'échographe reste le même. Il suffit d'avoir plusieurs pièces d'élastomères fabriquées différemment, chacune correspondant à un front d'onde particulier. Un peu comme on dispose de plusieurs lentilles pour un appareil optique. En l'état actuel, ce procédé innovant de pince acoustique n'est pas encore assez mûr pour permettre d'attraper des objets, et les recherches doivent se prolonger. Mais la combinaison entre économie, souplesse d'utilisation et focalisation promet des applications inédites ■

VORTEX

Le son et la lumière combinés

Pour créer un vortex acoustique, l'Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux a présenté en 2019 une méthode consistant à placer sur un échographe une lentille d'élastomère divisée en plusieurs zones de densités différentes. Mais les propriétés du matériau peuvent être obtenues autrement. *« En éclairant les polymères, on va pouvoir jouer sur la réticulation de cet élastomère* [les liens chimiques du matériau], explique Thomas Brunet. *En augmentant la rigidité du matériau, on augmente la vitesse du son qui passe à travers et, à l'inverse, en le ramollissant, on ralentit.* » Ce n'est plus la conception de la lentille elle-même qui fait la pince acoustique mais la manière dont elle est éclairée. L'intérêt ? Ne plus avoir à changer de pièce d'élastomère selon la focalisation que l'on veut obtenir pour tel ou tel usage. Non seulement on garde toujours la même source d'onde sonore (l'échographe), mais on conserve également la même pièce d'élastomère. Seulement, cette dernière devient reconfigurable à l'envi, réutilisable indéfiniment.

ÉPISTÉMOLOGIE

Aux origines de la lévitation acoustique

C'est en janvier 1933 que les chercheurs Karl Bucks et Hans Müller de la Technische Hochschule Breslau (devenue l'École polytechnique de Wroclaw, en Pologne) apportent la première preuve de la lévitation acoustique. Une onde stationnaire piège des gouttes d'alcool entre un émetteur et un réflecteur. Mais il faut attendre les travaux de Bruce Drinkwater à l'université de Bristol (Royaume-Uni) en 2010 pour voir apparaître des « pinces acoustiques », qui prennent des objets en 3D. Puis, en janvier 2016, c'est une première : une équipe de l'Institut des nanosciences de Paris génère un vortex capable d'attraper une bille de polystyrène dans de l'eau, ouvrant la voie à des usages *in vivo*.

Le vieillissement sous l'eau bonifierait le vin

Stocké sous l'eau, le vin vieillirait mieux que dans des caves, du fait des fortes pressions, des basses températures et de la modification des échanges gazeux. Une expérience inédite mobilisant plusieurs laboratoires de recherche vient de débuter à Colmar pour le vérifier.

L'engouement est réel, la vogue indéniable. Depuis une dizaine d'années, de plus en plus de vignerons et de sommeliers immergent des bouteilles pour les faire vieillir et les bonifier. En mer, dans des lacs ou encore des rivières. En France, de telles opérations ont été réalisées, entre autres, au large de Saint-Malo, en Corse, dans le bassin d'Arcachon, le lac Léman et au fond du gouffre de Padirac, dans la région de Cahors. En mars 2021, 1000 bouteilles de roussanne ont même été récupérées des profondeurs glacées du lac de Tignes — à l'aide d'un hélicoptère ! — où elles ont séjourné une année durant. Selon les cas et les témoignages, les vins immergés seraient plus soyeux, plus charnus, rafraîchis, tantôt plus expressifs, tantôt assagis… Meilleurs, en tout cas, que ceux gardés en cave de manière classique.

Entre analyse physico-chimique et expérience organoleptique

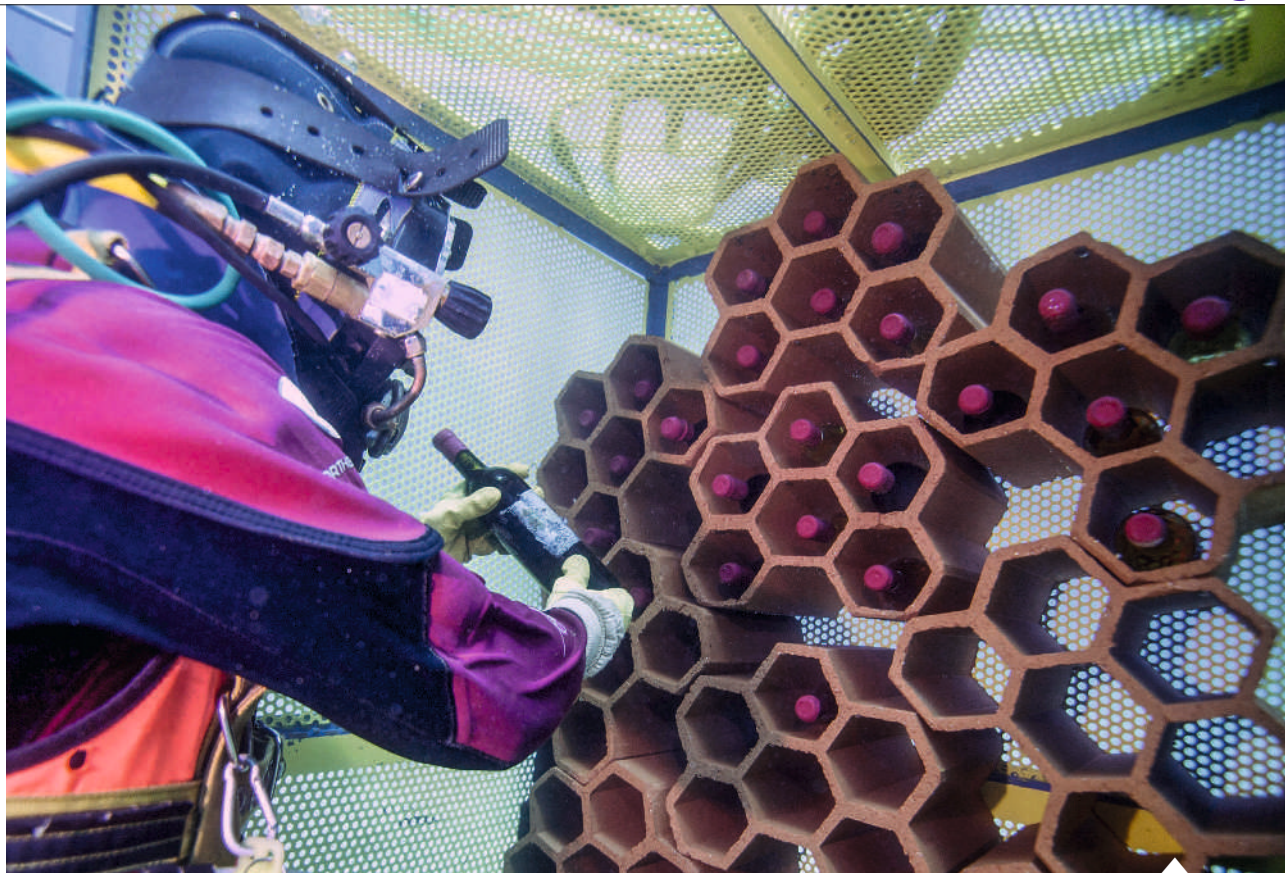
Comment le temps passé sous l'eau affecte-t-il l'expérience gustative et la physico-chimie des breuvages ? Pour le savoir, la ville de Colmar — capitale des vins d'Alsace — a lancé un projet inédit impliquant plusieurs laboratoires de recherche. Elle a fait immerger en octobre dernier 300 bouteilles de crémant dans la base nautique de Colmar-Houssen à 25 mètres de profondeur. Auparavant, Serge Dubs, sommelier d'un restaurant étoilé, a dégusté à l'aveugle trois de ces bouteilles. Tous les deux ans, des bouteilles seront retirées de l'eau pour être goûtées. Mais elles seront surtout analysées par des physiciens, chimistes et biochimistes de l'Institut national de recherche pour l'agriculture (Centre Inrae Grand Est-Colmar), de l'université de Haute-Alsace (UHA) et de l'université de Reims Champagne-Ardenne. *« C'est la première fois, à ma connaissance, que des études scientifiques seront réalisées pour caractériser les effets du vieillissement des vins effervescents sous l'eau,* relève le physicien Gérard Liger-Belair, spécialiste des vins effervescents à l'université de Reims Champagne-Ardenne. *Cette méthode devrait induire, de toute évidence, un certain nombre de modifications puisque les conditions de conservation sont très différentes de celles d'une cave.* »

Sous l'eau, l'obscurité est totale et la pression plus élevée. La température est également plus basse, ce qui diminue la cinétique des mécanismes réactionnels à l'œuvre à l'intérieur des flacons.

CONSERVATION

Du champagne dégusté après 170 ans d'immersion

En 2015, un consortium de scientifiques a analysé une centaine de bouteilles de champagne retrouvées dans l'épave d'un navire qui avait sombré dans la mer Baltique au début du XIXe siècle. Elles étaient restées ainsi 170 ans sous la mer, à 50 mètres de profondeur et à une température constante de 4 °C. Ils ont découvert que ces flacons avaient parfaitement conservé les caractères intrinsèques — en matière d'alcool, de sucres, d'arômes, d'acides organiques ou de glycérol — des vins de Champagne. Mais faute d'avoir une bouteille témoin, ils n'ont pas pu savoir si le breuvage s'était bonifié.



BORIS HORVAT / AFP

H. KIELWASSER/ PHOTOPQR/ L'ALSACE/MAXPPP

Si les caves à vin sous-marines sont en vogue (ci-dessus, au large de Saint-Mandrier, dans le Var), l'expérience scientifique menée à Colmar, dans le Haut-Rhin (ci-contre, en octobre 2021), est quant à elle une première. ◄

Mais la différence majeure concerne les échanges gazeux. Le dioxyde de carbone des vins effervescents peut certes fuiter très légèrement des bouteilles en passant par les micropores des bouchons. Mais, contrairement à ce qui se produit dans une cave, les gaz atmosphériques ne peuvent s'immiscer dans les bouteilles immergées. L'oxygène notamment, qui suscite des réactions d'oxydation et qui joue un rôle fondamental dans les processus de vieillissement.

« La plupart des témoignages rapportent que le vin vieilli sous l'eau s'en trouve bonifié. Mais c'est peut-être un préjugé lié au cérémonial et au caractère très exceptionnel de telles immersions. Seuls des résultats objectifs, réalisés en combinant des outils analytiques et des séances de dégustation, mettront tout le monde d'accord et permettront de trancher quant à l'évolution différente des vins immergés ou vieillis en cave », estime Gérard Liger-Belair. Son équipe mesurera ainsi l'évolution de la moussabilité des vins à la fois immergés et vieillis en cave, ainsi que la quantité de dioxyde de carbone dissous dans les flacons. Ce paramètre conditionne en effet la taille, la vitesse et la dynamique d'éclatement des bulles qui elles-mêmes libèrent les arômes sous le nez des consommateurs.

Grâce à des instruments de pointe, notamment la spectroscopie de masse, les chercheurs de l'Inrae et de l'UHA analyseront pour leur part l'évolution de la composition moléculaire : les molécules volatiles, susceptibles de participer à l'expérience organoleptique, mais aussi des centaines de constituants solubles qui définissent la complexité et le paysage moléculaire des vins. Ces évolutions seront corrélées aux appréciations de Serge Dubs et d'autres œnologues. *« Si un lot est préféré à un autre, nous pourrons l'objectiver et tenter de comprendre ce qu'il s'est passé à l'échelle moléculaire »*, augure Gérard Liger-Belair. Le premier verdict est donc attendu en 2023. ■

Franck Daninos @fdaninos

XAVIER PASCO
DIRECTEUR DE LA FONDATION POUR LA RECHERCHE STRATÉGIQUE

« Un lanceur réutilisable européen pour contrer la concurrence »

ArianeGroup, leader européen des lanceurs spatiaux, veut développer d'ici à 2026 un mini-lanceur réutilisable, baptisé Maïa. Une réaction logique face à la concurrence de SpaceX, explique Xavier Pasco, spécialiste du spatial américain.

Qu'est-ce qui a motivé la décision de construire le lanceur réutilisable Maïa, alors que le nouveau lanceur Ariane 6 doit être inauguré en 2022 ?
Xavier Pasco : C'est une réaction à la transformation du paysage du lancement induite par SpaceX, la société d'Elon Musk. Ariane 6 arrive sur un marché bousculé par l'intensification de ce modèle qui repose sur le réutilisable. Aujourd'hui, le lanceur Falcon 9 de SpaceX est celui qui connaît le plus de tirs et qui réutilise jusqu'à 10 fois ses étages ! Et cela fonctionne. SpaceX met la pression sur le peu qu'il restait du marché commercial. Avec l'arrivée de nouveaux concurrents tels que l'Inde ou l'américain Rocketlab, l'Europe des lanceurs a besoin d'une nouvelle feuille de route stratégique.

L'Europe entre-t-elle dans l'ère du réutilisable ?
ArianeGroup avait déjà lancé des études pour développer le moteur Prometheus et le démonstrateur de premier étage Themis, tous deux réutilisables. Maïa assure la transition de ces programmes expérimentaux vers un programme opérationnel. Cela permet de se projeter dans l'après d'Ariane 6 en développant une brique technologique qui servira à un système futur. C'est le point de départ d'une possible famille de lanceurs réutilisables. L'objectif est aussi de recentrer les forces européennes qui avaient tendance à se disperser. Notamment l'Allemagne, qui soutient des sociétés de micro-lanceurs et dont la présence s'intensifie dans ce domaine. ArianeGroup se positionne à son tour sur ce marché.

Quelle pourrait être l'utilité de ces micro-lanceurs ?
Ils pourraient servir à la maintenance des constellations de satellites. S'il est plus judicieux de les mettre en place par grappes à l'aide de gros lanceurs, cela pourrait être utile ensuite pour remplacer ponctuellement un satellite en panne. Il y a aujourd'hui une centaine de projets de micro-lanceurs dans le monde. Une poignée d'entre eux seulement va survivre. Il est important à court terme d'occuper cette niche,

XAVIER PASCO

BIO EXPRESS

- **1964 :** Naissance à Nantes (Loire-Atlantique).
- **1994 :** Docteur en science politique à l'université de Paris-Sorbonne. Maître de recherche à la Fondation pour la recherche stratégique (FRS), en charge du département « Technologie, espace et sécurité ».
- **2007 :** Expert auprès du Comité économique et social européen.
- **2012 :** Membre de l'International Academy of Astronautics.
- **2016 :** Directeur de la FRS.
- **2017 :** Publie *Le Nouvel Âge spatial : de la guerre froide au New Space* (CNRS Éditions).

CNES/REALDREAM, 2021

Le démonstrateur Themis, projet européen de premier étage de fusée réutilisable expérimenté depuis 2019 (vue d'artiste), servira de base pour la construction du futur lanceur Maïa.

même si la question du volume de lancements potentiels se pose.

Le réutilisable a-t-il fait la preuve de sa rentabilité ?

Aujourd'hui, il y a à la fois un pari et un scepticisme sur la réutilisabilité. SpaceX propose des prix bas, aidé par le reconditionnement rapide de ses étages. Mais on ne connaît pas le coût de cette étape. La rentabilité du modèle de SpaceX est liée à la mise sur orbite de sa propre constellation de satellites Starlink. Pour atteindre le nombre de 12 000 satellites en orbite annoncé, cela implique des lancements fréquents, qui justifient de réutiliser beaucoup et à grand rythme les étages des lanceurs. Les 18 et 19 décembre dernier, la société d'Elon Musk a ainsi effectué deux tirs de Falcon 9 à seulement 15 heures d'intervalle. Mais ce modèle repose sur une base fragile, faite de paris sur l'avenir. SpaceX se finance pour une grande part grâce au marché des satellites institutionnels de la Nasa et du Pentagone et dépend donc de l'argent public.

Ce modèle peut-il être appliqué à l'Europe ?

Nous n'avons pas le même volume de lancements. Pour le lanceur Ariane 6, il est prévu aujourd'hui sept tirs par an, dont quatre institutionnels. L'Europe a peu de besoins spatiaux. Le réutilisable nécessiterait de lancer une constellation européenne et de participer aux programmes d'exploration. Le marché des lancements est investi à 95 % par les institutionnels. Aux États-Unis, en Russie et en Chine, il y a presque obligation pour cela d'utiliser les lanceurs nationaux. Ce n'est pas le cas en Europe. L'Allemagne veut ainsi mettre en orbite ses satellites militaires avec Falcon 9 ! En définitive, la question de la rentabilité ne s'applique pas au modèle industriel des lanceurs. Le spatial est tenu à bout de bras par les gouvernements qui en financent la recherche et le développement et fournissent des lancements. Un lanceur, c'est d'abord un accès autonome à l'espace pour le gouvernement qui le finance. Et si on peut glaner de l'argent sur le marché commercial, c'est la cerise sur le gâteau. En Europe, le succès commercial d'Arianespace a entretenu une vision libérale du lancement. Une vision qui a ses limites dans une activité qui reste très régalienne. Il faut penser à long terme et cela explique le programme Maïa. Car aujourd'hui on ne peut plus écarter le réutilisable dans le spatial.

Pourquoi y a-t-il eu autant de scepticisme autour d'un choix industriel* a priori *logique ?

La réutilisation a longtemps été diabolisée car elle évoquait la navette américaine, qui s'est avérée l'un des lanceurs les plus coûteux de l'histoire. Puis Elon Musk a démontré qu'on pouvait même mettre des humains en orbite avec des capsules réutilisées, *a priori* sans danger et à un rythme soutenu. Tout le monde a été pris de court. Ce modèle va dans le sens d'un transport plus résilient et moins coûteux, sachant qu'il y aura de plus en plus de lancements spatiaux à l'avenir. À la fin de la décennie, on devrait avoir plusieurs infrastructures orbitales desservies par des lanceurs qui vont et viennent. ■

Propos recueillis par Sylvie Rouat @srouat1

CLAUS LUNAU/SPL/SUCRÉ SALÉ

Une gigantesque explosion (en haut, vue d'artiste) a eu lieu le 30 juin 1908 sur le site de la Tougouska, en Sibérie centrale, dont l'onde de choc s'est ressentie jusqu'au Royaume-Uni, et dont les traces sont encore visibles (en bas), notamment sur la zone de l'épicentre où la forêt détruite n'a pas repoussé. Si son origine cosmique est avérée, les hypothèses continuent de se faire jour sur cet événement.

Toungouska

Sur les traces du mystérieux astéroïde

L'explosion survenue en 1908 au cœur de la Sibérie a provoqué la plus grande onde de choc de mémoire d'humain et reste une énigme scientifique non résolue. Selon l'hypothèse la plus récente élaborée par un chercheur russe, un astéroïde de fer aurait traversé l'atmosphère sans heurter le sol. Récit de cet événement fascinant.

Par notre envoyée spéciale Estelle Levresse. Photos : Yulia Nevskaya

La taïga s'étend à perte de vue sur des kilomètres. En cette radieuse journée d'automne, fin octobre 2021, la forêt boréale du territoire evenk pratiquement inhabité présente de magnifiques couleurs dorées, mélange de jaune rosé. Çà et là, des taches blanches rappellent que la saison hivernale est toute proche dans cette région au climat extrême du nord de la Russie. Après une quarantaine de minutes de vol, depuis le village de Vanavara, l'hélicoptère commence à ralentir. Au sol, les arbres laissent la place à un paysage à la végétation rase : une zone de marécages sur un large périmètre à la forme aléatoire.

Voici le site de la Toungouska, en Sibérie centrale, à plus de 5000 kilomètres de Moscou. C'est ici, le 30 juin 1908, à 7 h 14 du matin, qu'une terrible déflagration a balayé 2200 kilomètres carrés de forêt (soit plus de 20 fois la superficie de Paris) et détruit plus de 60 millions d'arbres. À l'époque, les ondes sismiques sont ressenties du lac Baïkal au Royaume-Uni. La puissance de l'explosion est estimée à 1000 fois celle de la bombe atomique d'Hiroshima. Pendant plusieurs jours, le ciel reste lumineux y compris la nuit. Le phénomène est observé jusqu'en Europe.

L'hélicoptère atterrit en bordure de taïga. Plus d'un siècle a passé depuis l'événement et la nature a repris ses droits. Les arbres ont repoussé partout, sauf à l'épicentre *(lire l'encadré p. 55)*. En 1995, afin de préserver le site, la réserve naturelle d'État de la Toungouska a été créée sur une surface de près de 300 000 hectares. Inaccessible sans autorisation spéciale, elle est surveillée par une équipe de gardes ▸

Nelly Elkina perpétue les récits de son grand-père, un éleveur de rennes qui fut le témoin direct de l'explosion de 1908.

Plus de 60 millions d'arbres auraient été détruits lors de la déflagration, soit 2200 km² de taïga sibérienne.

forestiers qui séjournent sur place par roulement. Habitués des lieux, deux d'entre eux, Evgenya Moroz et Artur Meïdouss invitent à aller, à travers la taïga, sur les pas de Leonid Koulik, minéralogiste russe dont le nom est indissociable du mystère de la Tougouska.

Des investigations commencées dans les années 1920

C'est en 1921 que le scientifique commence ses investigations. Alors âgé de 38 ans, il est employé du Musée minéralogique de Leningrad (aujourd'hui Saint-Pétersbourg), où il vient de créer le département des météorites. Convaincu que le cataclysme était la conséquence d'un impact de météorite, il demande à l'Académie des sciences soviétique de financer une expédition *« préliminaire et exploratoire »*. Elle aura lieu en 1927, près de 19 ans après l'événement. Ce sont des chasseurs du peuple evenk, recrutés à Vanavara, qui conduisent Leonid Koulik jusqu'à la zone où la forêt est ravagée. Arrivé sur les lieux après plusieurs semaines de marche, le scientifique écrit dans son journal : *« Je ne peux pas vraiment imaginer l'énormité de cette chute exceptionnelle. […] De notre point d'observation, on ne voit plus aucun signe de la forêt ; tout est tombé et brûlé. […] C'est effrayant de voir des géants de dix ou 20 mètres cassés en deux, comme des roseaux. »* Dans la réserve naturelle de la Tougouska, le camp de Leonid Koulik construit à partir des arbres tombés au sol pendant l'explosion tient toujours debout. *« Durant la première expédition, le groupe a eu très faim. Les hommes ont été malades,* relate Evgenya Moroz. *C'étaient des citadins, ils ne savaient pas ce qu'on doit faire ou ne pas faire dans la taïga, notamment comment éviter la carence en vitamine C. »*

Mais l'explorateur ne trouve ni cratère, ni débris. Restant convaincu de son intuition, il organise trois autres expéditions entre 1928 et 1939, au cours desquelles il continue de chercher des traces de météorite tout en recueillant des témoignages. Il décide même, au prix d'un travail acharné, de faire assécher un marécage situé dans la zone de l'épicentre, pensant qu'il s'agit d'un cratère météoritique. À sa grande déception, les résultats ne sont pas concluants. En 1941, la Seconde Guerre mondiale empêche la tenue d'une cinquième expédition. À 58 ans, Leonid Koulik insiste pour partir au front. Rapidement fait prisonnier, il décède du typhus en 1942.

Le site de la Tougouska, à près de 5000 km de Moscou. La puissance de l'onde de choc qui a suivi l'explosion est estimée à mille fois celle de la bombe d'Hiroshima.

Les explorations sur le site de la Tougouska reprennent à la fin des années 1950, menées par des équipes venues de différents pays. Désormais, ce sont les gardes forestiers de la réserve qui guident les expéditions. Le « sentier Koulik » est un itinéraire de 7 kilomètres qui conduit à leur camp de base. Équipée d'une kalachnikov pour se défendre en cas d'attaque d'ours, Evgenya Moroz ouvre la marche. Dans ce territoire abrité de toute activité humaine, les arbres sont magnifiques et les senteurs de la forêt ultrapuissantes.

De retour à Vanavara, la localité la plus proche de la réserve, les références à l'événement de la Tougouska sont partout : au centre du village — avec un monument « météorite » inauguré par un célèbre cosmonaute russe —, au musée local, à la bibliothèque municipale, ou dans le nom des rues : « rue de la Météorite », « rue Leonid Koulik »…

Après l'explosion, les habitants ont perdu connaissance

Et aujourd'hui encore, des descendants de témoins directs de l'explosion témoignent. Nelly Elkina est la petite-fille d'un éleveur de rennes qui a vécu l'explosion. *« Selon les récits de mon grand-père, quand la météorite est tombée, il y a eu un bruit énorme et la chaleur était si forte qu'ils voulaient jeter leurs vêtements, il leur semblait qu'ils brûlaient. C'était terrible. Imaginez, un arbre qui tombe, c'est bruyant, mais toute la taïga… cela doit être effrayant ! »*, se souvient la femme evenk, vêtue d'une robe violette et d'un bandeau traditionnel en perles assorti. *« Puis ils ont perdu connaissance. Quand ils se sont réveillés, ils sont allés chercher leurs rennes, les animaux étaient tous morts et presque tous les arbres étaient tombés. »*

Que sait-on aujourd'hui de l'origine exacte de cet événement ? De nombreuses hypothèses ont été émises depuis 1908, des plus crédibles aux plus farfelues : comète, astéroïde, phénomène géophysique, boule de foudre, essais nucléaires, tests de Nicolas Tesla pour ses travaux sur l'énergie électrique, attaque extraterrestre… En Russie, l'événement est la source de plusieurs légendes et histoires populaires. Dans *L'Île brûlante*, paru en 1936, l'auteur russe Alexandre Kazantsev attribue ainsi l'événement de la Tougouska au crash d'un vaisseau extraterrestre doté d'un moteur atomique. Une légende evenk raconte que le dieu du tonnerre Ogdy, en colère contre les hommes, est descendu sur Terre en tirant des flèches enflammées et a détruit la taïga. Une autre prétend qu'il a envoyé des oiseaux de fer pour venger un chaman puissant… Il faut dire que les circonstances sont propices au mystère : une explosion dévastatrice dans un territoire totalement reculé de Sibérie, pas d'indices tangibles, ni débris d'objets cosmiques, ni cratère d'impact, des expéditions scientifiques tardives.

Bien que l'énigme ne soit pas totalement résolue, les spécialistes s'accordent aujourd'hui sur l'explication générale. *« On n'a plus de doute sur la nature cosmique de l'événement »*, déclare Ludovic Ferrière du musée d'Histoire naturelle de Vienne, en Autriche, géologue, expert

Cette photo de 1927 prise par l'explorateur Leonid Koulik montre la dévastation de la zone dix-neuf ans après l'impact.

GÉOLOGIE

Le mystère de l'épicentre

Lors de ses expéditions sur les lieux du phénomène de la Tougouska, le minéralogiste russe Leonid Koulik découvre une zone marécageuse, comme si ici seulement, la forêt n'avait pas pu repousser. C'est l'épicentre de la déflagration de 1908. À cet endroit, l'énergie libérée par l'explosion et l'incendie qui a suivi été si forte qu'elle a fait fondre le pergélisol (sous-sol gelé en permanence, qui couvre plus de 60 % du territoire russe). Ceci a conduit à la formation de cratères thermokarstiques — des dépressions du terrain dues au tassement du sol consécutif à la fonte de la glace. Les arbres qui absorbaient l'humidité du sol ayant été détruits, un excès d'humidité s'est accumulé dans ces cratères et, avec le temps, se sont formées des tourbières à sphaigne — zones où se développe une végétation de mousses dont la partie inférieure, dans l'eau, se décompose partiellement pour donner la tourbe. Ce qui explique l'absence d'arbres. Mais la zone n'est pas « morte » pour autant, au contraire : les tourbières à sphaigne ont une grande valeur écologique car elles sont recouvertes de baies et constituent un lieu de repos pour la faune. Dans la réserve naturelle de la Tougouska, se reproduisent ainsi deux sous-espèces de faucons pèlerins, espèces protégées en Russie. Les tourbières sont aussi habitées par des ours bruns, des élans, des loups, des renards, des carcajous et des rennes sauvages. De la catastrophe est né un petit paradis écologique.

des impacts météoritiques. « *Les hypothèses les plus communément admises évoquent soit une comète (faite de glace et poussière) désagrégée en vol, soit un astéroïde de type pierreux, dont les poussières auraient été transportées loin.* » En 2016, les Nations unies ont déclaré le 30 juin Journée internationale des astéroïdes en l'honneur de la Tougouska.

Un astéroïde en fer aurait traversé l'atmosphère sur 700 km

Des scientifiques continuent de travailler sur le mystère. Chercheur à l'université fédérale de Sibérie à Krasnoïarsk, Sergueï Karpov a formulé avec son équipe une nouvelle théorie, publiée en 2020 dans la revue *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*, selon laquelle c'est un astéroïde de fer ayant traversé l'atmosphère qui serait à l'origine de l'événement de la Tougouska. Pour eux, cela explique l'absence de débris et de cratère sur la zone, la destruction de la forêt ayant été provoquée par l'onde de choc. « *Nous avons construit un modèle mathématique rigoureux incluant les forces en jeu : la force gravitationnelle et la force de traînée aérodynamique* », détaille Sergueï Karpov, chevelure blanche coiffée en arrière. Dans la salle de classe où il donne cours, le professeur se met à dessiner sur le grand tableau bordeaux. « *Le corps cosmique arrive de cette manière — en rasant la surface de la Terre, il traverse l'atmosphère — à une altitude minimale de 10 kilomètres au-dessus de l'épicentre, puis ressort pour voyager plus loin.* »

Le chercheur russe Sergueï Karpov décrit au tableau le parcours de l'astéroïde ferreux, au cœur de son hypothèse sur le phénomène de la Tougouska.

Selon les calculs du chercheur, seul un corps en fer pouvait résister aux forces aérodynamiques : « *Un corps pierreux aurait nécessairement commencé à se fragmenter et on aurait pu retrouver des fragments de météorite, mais on n'a rien trouvé, une comète n'aurait pas été assez résistante.* » En outre, sa taille devait être suffisamment grande pour ne pas s'évaporer sous l'effet de la chaleur intense. « *Nous avons testé notre hypothèse avec des objets de 50, 100 et 200 mètres de diamètre : seul le plus grand est en accord avec elle. Nous estimons que le corps ferreux a perdu environ la moitié de sa masse par sublimation avant de ressortir de l'atmosphère et continuer sa route.* » Sergueï Karpov poursuit son schéma : « *La longueur du parcours du corps spatial dans l'atmosphère a été d'environ 700 kilomètres. À partir d'une altitude assez basse, il a commencé à briller intensément. C'est alors que les témoins l'ont remarqué. Il était beaucoup plus brillant que le Soleil* », commente-t-il.

Reste une question de taille. Comment expliquer l'énorme onde de choc en forme de papillon qui a couché des millions d'arbres ? « *Nous devons calculer l'impact aérodynamique et expliquer la forme de l'onde de choc* », reconnaît Sergueï Karpov. « *C'est la partie non résolue du problème. Et ce n'est pas une tâche facile, il nous faut trouver des spécialistes qui puissent nous aider avec cette modélisation.* » Le travail sur l'onde de choc est précisément ce qui fait défaut dans les recherches de Sergueï Karpov, estime Ludovic Ferrière. « *L'hypothèse d'un astéroïde qui a traversé l'atmosphère est intéressante, cela s'est déjà produit et le modèle est sérieux.*

MINÉRALOGIE

Au Chili, une comète a vitrifié le sol

Tordus, pliés en divers endroits voire complètement entortillés sur eux-mêmes, d'étranges morceaux de verre mesurant jusqu'à 50 cm de diamètre jonchent le sol près de la ville de Pica, dans le désert d'Atacama au nord du Chili. Ils ont été découverts en 2012 mais ce n'est qu'en novembre 2021 que leur présence a été expliquée par des chercheurs américains et chiliens : les roches ont été vitrifiées lors de l'explosion d'une comète juste au-dessus du sol, il y a environ 12 000 ans. Pour le prouver, les scientifiques ont identifié un minéral appelé baddéléyite (dérivé du zirconium, de formule ZrO_2), qui se forme à une température supérieure à 1700 °C. Mieux : ils ont mis en évidence une série de composés (comme la cubanite, la troïlite et autres inclusions riches en calcium et aluminium) qui sont des signatures minéralogiques des comètes. Franck Daninos

RETOUR SUR

La pluie de météorites de Tcheliabinsk

C'était à peine plus d'un siècle après Toungouska : le 15 février 2013, à 9 h 25 du matin, une boule de feu traverse le ciel à une vitesse de 19 km par seconde dans la région de Tcheliabinsk, ville industrielle de l'Oural en Russie. L'événement, survenu en plein jour, a été filmé en direct par des centaines de caméras. En pénétrant dans l'atmosphère terrestre, l'objet cosmique (dont la taille est estimée à une vingtaine de mètres de diamètre) se fragmente en milliers de rochers, causant une pluie de météorites. Le plus gros, pesant probablement entre 400 et 500 kg, est tombé dans un lac sans faire de victime. Le bilan officiel fait néanmoins état de 1600 blessés et les dégâts ont été estimés à 25 millions d'euros. « *Dans la ville, l'onde de choc est arrivée par le côté, c'est pourquoi les vitres ont été soufflées* », explique Mark Boslough. L'expert en impacts planétaires a modélisé la trajectoire de l'astéroïde « Tcheliabinsk 2013 ». Ses travaux ont été publiés dans la revue *Nature* en novembre 2013. Le chercheur y estime notamment que le nombre d'explosions aériennes de ce type est sans doute sous-estimé.

M. AHMETVALEEV

Le 15 février 2013, un astéroïde se désintégrait dans la région de Tcheliabinsk, en Russie.

En revanche, je trouve que le parallèle avec la Toungouska est un peu léger. Il manque le calcul de l'onde de choc permettant de relier le modèle à l'événement de 1908. »

Partageant cet avis, Mark Boslough, expert dans l'étude des impacts planétaires, va plus loin en remettant en cause le postulat de départ. « *Ils tentent d'expliquer l'absence de débris et de cratère, mais c'est à mon sens un faux problème : elle est tout à fait explicable si l'objet se fragmente complètement.* »

Ce physicien américain, chercheur aux Sandia National Laboratories (États-Unis), juge également que la forme de l'onde de choc observée sur le terrain n'est pas compatible avec la théorie de Sergueï Karpov. « *Si on considère qu'il s'agit d'un astéroïde de passage qui va très vite, l'objet ressemble à un crayon : pointu à l'avant puis cylindrique. Ainsi l'onde de choc devrait ressembler à ce qu'engendre un bateau quand il passe sur l'eau : une vague et un sillage. Dans ce cas, il ne devrait pas y avoir d'épicentre.* » Or, poursuit le chercheur, il y a bel et bien un épicentre à la Toungouska et à cet endroit, précisément, quelques arbres sont restés debout, les branches arrachées prouvant que l'onde de choc venait à la verticale.

À Krasnoïarsk, Sergueï Karpov n'est pas nécessairement pressé de résoudre le mystère. « *De nombreux livres ont été écrits sur le phénomène de la Toungouska. Lorsque les enfants prennent ces livres en main, ils veulent comprendre par eux-mêmes, ils commencent à s'intéresser à l'astronomie, puis plus généralement à la physique, aux sciences. C'est très important. Si la solution est trouvée, tout sera expliqué, il n'y aura plus de livres… Serait-ce vraiment une bonne chose ?* », s'interroge le physicien russe. ■

« Nous devons calculer l'impact aérodynamique et expliquer la forme de l'onde de choc »

Sergueï Karpov, chercheur à l'université fédérale de Sibérie, à Krasnoïarsk (Russie)

Le tardigrade, cet as de la survie

Ces animaux minuscules fascinent les chercheurs par leur faculté à résister aux conditions extrêmes. Crashés sur la Lune, tirés dans des balles de revolver, congelés, privés d'oxygène, bombardés de radiations, les oursons d'eau ont subi des dizaines d'expérimentations. Et si la clé de l'énigme résidait dans une mystérieuse protéine ?

Ces bébêtes microscopiques si atypiques sont désormais bien connues. Comble de la notoriété, on a même pu les croiser récemment dans un album de Spirou ou au sein des productions cinématographiques Marvel où elles manquent de croquer le super-héros Ant-Man devenu encore plus riquiqui qu'elles… Mais les connaît-on aussi bien que cela, ces « oursons d'eau », comme on les surnomme ? Pas vraiment. Ce sont des animaux encore empreints de nombreux mystères que l'être humain aimerait élucider. Ne serait-ce que leur étonnante résistance face à quantité de conditions extrêmes. Coup sur coup, plusieurs publications scientifiques confirment que ces lilliputiens à huit pattes sont les champions de la survie tous azimuts. Ils résistent en effet aux chocs, à la dessiccation, à la congélation dans l'azote liquide (-272 °C), aux radiations cosmiques et au vide spatial ! Ils ont même été crashés sur la Lune *(lire ci-contre)*.

« *Nous disposons d'environ 200 spécimens de tardigrades préservés sur des lames de microscope* », détaille Cédric Hubas, qui gère notamment les collections de méiofaune (ensemble des animaux mesurant entre 0,1 et 1 mm) conservées au Muséum national d'histoire naturelle à Paris. Et ce n'est pas pour le plaisir de la collectionnite. Car, en dépit du fait que l'on ne recense pas moins de 750 espèces, au premier coup d'œil, rien ne ressemble plus à un tardigrade qu'un autre tardigrade. « *Il faut vraiment être un spécialiste pour les différencier, d'où l'utilité de cette collection. La classification se fait selon les caractères morphologiques du spécimen : la forme de ses griffes, de ses plaques, son ornementation, etc.* » Autre méthode pour les différencier : leurs œufs, bien plus parlants. Mais encore faut-il en disposer…

Deux chercheurs de l'université de Copenhague (Danemark) (1) tentent de faire le point sur tous les outils que l'animal pourrait employer pour acquérir une telle résistance à tous les sévices qu'on lui a fait subir depuis plus de trois siècles. « *La physiologie cellulaire des tar-*

ESPACE

Un test de résistance sur la Lune

Crash ! La sonde israélienne Bereshit s'est écrasée à la surface de la Lune, le 11 avril 2019. À son bord, voyageaient un millier de tardigrades déshydratés. Les animaux sont-ils encore vivants et ont-ils survécu à l'explosion de l'engin spatial ? Rien n'est moins sûr. « *Étant donné la vitesse de la sonde, il est peu probable que les animaux aient survécu*, estime Cédric Hubas, du Muséum national d'histoire naturelle à Paris. *De plus, s'ils sont très résistants au froid, ils sont bien plus sensibles à de fortes chaleurs telles que l'explosion de cette sonde.* » Les tardigrades ne risquent donc pas de coloniser notre satellite. Les conditions lunaires — manque d'eau, d'atmosphère, de nutriments — les empêcheraient de toute façon de sortir de leur stase (ralentissement organique). Au mieux, la Lune est donc devenue le premier cimetière spatial de tardigrades.

EYE OF SCIENCE/SCIENCE PHOTO LIBRARY/ SUCRE SALÉ

L'ourson d'eau aime les milieux humides, ici dans la mousse (vu en micrographie à balayage).

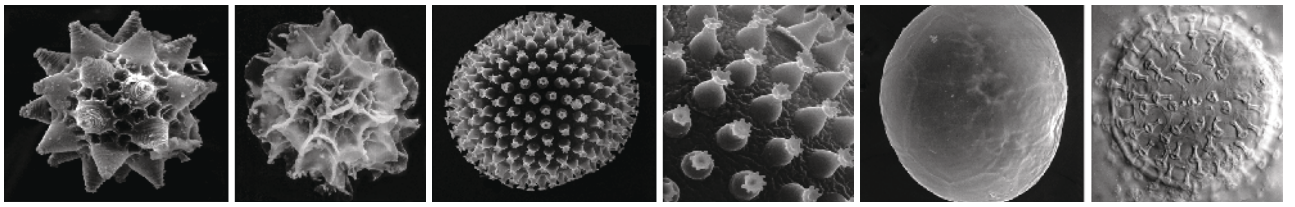
digrades est très peu connue », se désolent les auteurs Nadja Møbjerg et Ricardo Cardoso Neves. De fait, cette méconnaissance nous a conduits à relever très peu d'indices pour expliquer les pouvoirs du tardigrade. Et ceci sur une petite poignée de spécimens. Car tous n'ont pas de superpouvoirs. Loin de là. En effet, il existe des tardigrades de pleine mer, et d'autres vivant dans les mousses ou les lichens. Et cela fait toute la différence ! L'évolution — inventive mais avant tout parcimonieuse — n'a pas conféré aux espèces marines des propriétés inutiles, protégées qu'elles sont par l'environnement. À l'inverse des « terrestres », beaucoup plus exposées aux aléas climatiques. *« Les qualifier ainsi est d'ailleurs un abus de langage,* prévient Cédric Hubas. *Ces animaux vivent aussi dans des biotopes humides.* »

Démythifions certaines légendes. Tout d'abord, concernant sa longévité. *« Certes, il peut survivre des dizaines d'années sous une forme quiescente* [sans activité manifeste], explique Cédric Hubas, *mais sa durée de vie naturelle semble assez courte, une ou deux années maximum.* » De plus, les résistants s'avèrent assez rares. On n'en connaît que quatre espèces, le génome de deux d'entre elles ayant été entièrement séquencé (*Hypsibius dujardini* et *Ramazzottius varieornatus*). Cette dernière, explique le chercheur, a été nommée d'après Giuseppe Ramazzotti, qui s'est intéressé à ces animaux vers 1960 : *« Pour l'anecdote, ce zoologue italien avait deux passions et il écrivit un traité sur chacune : les tardigrades, donc, et les pipes ! »* Parmi les composés suspectés de jouer un rôle dans les superpouvoirs du tardigrade, figure historiquement un sucre, le tréhalose. Relativement rare, il a tout de même été retrouvé un peu partout dans le règne du vivant : chez certaines bactéries, champignons, levures, plantes ou encore insectes. Seulement, les gènes nécessaires pour produire ce sucre n'ont été retrouvés que chez deux espèces de tardigrade. Aussi, son implication dans

EXPÉRIENCE

A-t-on des tardigrades sur la peau ?

« *Ce n'est pas du tout impossible !,* estime Cédric Hubas, maître de conférences au Muséum national d'histoire naturelle à Paris. *Une expérience avait été menée naguère avec un piège à pollen pour analyser la proportion des grains dans l'environnement. On y avait retrouvé des tardigrades en cryptobiose* [état de vie ralentie]. » Une découverte pas si surprenante que cela : très légers, les animaux peuvent être convoyés par le vent comme le sont les grains de pollen. Mais où pourrait-on en retrouver sur nous ? « *Dans un lieu humide et accessible*, imagine le chercheur. *Par exemple, il est très possible que des tardigrades puissent se nicher dans… nos trous de nez !* »



Présentant des excroissances très différentes, les œufs de tardigrade ont été pendant longtemps un moyen d'identifier les espèces.

DIANE R. NELSON, ROBERTO GUIDETTI, LORENAN REBECCHI

la résistance de l'animal a été plus ou moins délaissée au fil du temps. Abandonnée ? Pas pour autant.
« Si le tréhalose a effectivement un rôle protecteur, il peut être de deux sortes : soit il agit mécaniquement sur la cellule en la "vitrifiant", soit il se lie à certaines protéines de la cellule pour prendre la place de l'eau », explique Anas Malki de l'Institut de biologie structurale, à Grenoble. L'une de ces protéines pouvant être justement celle qui fait l'objet de l'étude (2) signée par Martin Blackledge, Anas Malki et leurs collègues. Le premier explique : *« Nous avons observé que sous l'effet d'un stress environnemental, une protéine (CAHS-8) change de forme et s'arrange en fibrilles. » « Ces fibres ressemblent un peu à un cytosquelette,* complète Anas Malki. *Nos travaux mettent en lumière que ces protéines dites désordonnées pourraient permettre au tardigrade de conserver son intégrité dans un environnement totalement desséché pour se mettre en état de veille, dit de cryptobiose. »* Des « protéines désordonnées » ? Comme le sont les prions pathologiques ? *« Il existe plusieurs sortes de protéines désordonnées,* rassure Martin Blackledge. *Certaines sont certes impliquées dans Alzheimer, Parkinson ou la maladie de Creutzfeldt-Jacob. Mais la très grande majorité de ces protéines sont nécessaires à l'organisme. Comme celles s'organisant en fibrilles, essentielles au bon fonctionnement du réseau de signalisation intracellulaire. Si ce réseau tombe en panne, l'organisme aussi, ce qui entraîne des maladies. »*

Tester les limites de l'animal avec du plasma froid

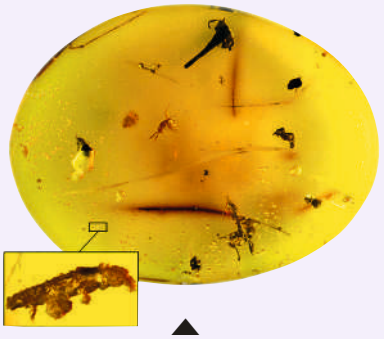
Pour aller plus loin, Martin Blackledge et Anas Malki ont en projet d'étudier l'effet de cette protéine dans les cellules et de mieux caractériser les réactions s'y produisant avec le concours de la spectroscopie par RMN (résonance magnétique nucléaire). Quant à Cédric Hubas, il envisage cette année avec le Muséum, en collaboration avec Thierry Dufour de Sorbonne Université à Paris, de bombarder le tardigrade… de plasma froid. *« Quelque chose qui n'a jamais été fait avant, alors que le plasma est quand même le quatrième état de la matière ! Cela va permettre de tester certaines des limites de l'animal. »* Crashés sur la Lune, tirés dans des balles de revolver, congelés, privés d'oxygène, bombardés de radiations et bientôt soumis à des décharges de plasma froid ! Décidément, les « oursons d'eau » en auront vu de toutes les couleurs… ■ **Hervé Ratel**

(1) « New insights into survival strategies of tardigrades », Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, 2021.
(2) « Intrinsically disordered tardigrade proteins self-assemble into fibrous gels in response to environmental stress », Angewandte Chemie, 2021.

PALÉONTOLOGIE

Piégé dans l'ambre depuis le miocène

En raison de leur rareté, on retrouve très peu de fossiles de tardigrades. Pourtant, en septembre 2021, une équipe internationale débusquait en République dominicaine un spécimen exceptionnel dans un morceau d'ambre vieux de 16 millions d'années. Ce n'est que le troisième spécimen fossile jamais retrouvé datant de l'époque du miocène. Les chercheurs estiment que cet ancêtre tardigrade appartient à la famille des *Isohypsibioidea*, encore vivante de nos jours. *« Une trouvaille importante car nous ne disposons malheureusement pas de beaucoup d'échantillons fossiles. Les tardigrades sont des animaux assez rares,* explique Cédric Hubas, maître de conférences au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. *Contrairement aux nématodes par exemple, ce n'est pas le groupe taxonomique le plus abondant dans les sédiments marins. »*



Long de moins d'un millimètre, ce fossile de tardigrade est âgé de 16 millions d'années.

PHILLIP BARDEN, HARVARD / N.J.IT.

Quand un bateau sombre, la vie prolifère

Une épave datant des guerres puniques a permis de reconstituer deux mille ans de colonisation par plus d'une centaine d'espèces d'organismes marins.

K. EGOROV / SOCIETÀ PER LA DOCUMENTAZIONE DEI SITI SOMMERSI - GLOBAL UNDERWATER EXPLORERS

Ce bélier d'une galère carthaginoise coulée près de la Sicile abrite 2200 ans de vie marine.

Les épaves de navires sont de véritables capsules de « *mémoire écologique de la biodiversité marine* », affirment les auteurs italiens d'une étude publiée en décembre 2021 dans *Frontiers in Marine Science*. Les chercheurs y décrivent comment ils ont réussi à recomposer plus de 2000 ans de colonisation d'un rostre de bronze par des organismes marins. Une première dans un domaine qui étudie généralement des épaves de moins d'un siècle.

L'aventure scientifique commence en octobre 2017, lorsque des plongeurs de l'organisation américaine Global Underwater Explorers remontent des fonds marins 12 béliers de galères carthaginoises découverts près des îles Égades, au nord-ouest de la Sicile. Soit les vestiges d'une colossale bataille navale qui a opposé, le 10 mars 241 avant notre ère, Romains et Carthaginois pour le contrôle de la Sicile et des routes commerciales maritimes afférentes. La victoire décisive de Rome, au large de Marsala, mit fin à la première guerre punique et envoya par le fond 50 navires de la flotte ennemie. En 2019, l'un des rostres des Égades doit être nettoyé et restauré par les scientifiques de l'Institut central de la restauration à Rome. Cette pièce creuse de bronze en forme de trident, gravée d'une inscription punique encore non déchiffrée, pèse 170 kg et mesure environ 90 cm de long. Sa restauration nécessite de retirer les organismes et sédiments accumulés en son sein et à sa surface. Ces blocs organiques sont au préalable numérisés, puis tamisés pour étude des coquilles au microscope par l'équipe menée par Maria Flavia Gravina, biologiste à l'université de Rome II.

Un vivier de 114 espèces d'invertébrés

Résultat : dans cet environnement circonscrit ont coexisté pas moins de 114 espèces d'invertébrés (gastéropodes, bivalves, vers polychètes et bryozoaires). Cette étude montre comment des sites vierges immergés évoluent progressivement vers des écosystèmes marins aux communautés stables et diversifiées. Les premiers arrivants, les « constructeurs », sont des organismes tels que les polychètes, les bryozoaires et quelques espèces de bivalves. Leurs larves, disséminées depuis d'autres colonies méditerranéennes, s'ancrent sur les surfaces de l'épave. Au cours de cette étape fondatrice, les bryozoaires (qui comprennent les roses de mer) font office de liens, de ponts entre les structures calcaires érigées par les architectes de la colonie. Viennent ensuite les « habitants », qui circulent librement entre ces structures calcaires. L'ordre d'arrivée de ces derniers demeure cependant inconnu. Cet agrégat d'espèces est similaire à ceux qui se développent dans les herbiers marins et les récifs coralligènes, alors que les épaves plus récentes hébergent généralement des communautés moins diversifiées. Avec le temps, ces épaves deviennent ainsi des habitats de plus en plus « naturels ». **Sylvie Rouat** @srouat1

GETTY IMAGES

La perte de la masse musculaire est une des conséquences de la carence en progestérone et œstrogènes à la ménopause.

Ménopause
Retarder l'échéance pour mieux vieillir

Réservés à des patientes touchées par des pathologies lourdes, les transplants de tissu ovarien pourraient devenir une approche courante dans le futur. Non pas pour repousser l'âge de la maternité mais pour effacer les troubles liés à la ménopause, réduire l'incidence de certaines maladies et même augmenter la longévité.

Par Nicolas Gutierrez C. @n6g6c

La fin des règles doit-elle nécessairement signifier le début du vieillissement féminin ? La recherche médicale multiplie les pistes pour démentir cette idée. Certes, cette étape de la vie est inéluctable. Aux alentours de 50 ans, le cycle ovarien s'arrête. La fin de la maturation folliculaire et de l'ovulation marque l'arrêt définitif de la fertilité chez la femme. Les dernières règles sont aussi accompagnées d'un autre phénomène : la fin de la production des hormones sexuelles, les œstrogènes et la progestérone. Elle entraîne la détérioration des certains organes sensibles à ces hormones, accélérant le vieillissement. Cependant, une alternative tout aussi efficace pourrait changer la donne dans un futur proche : la transplantation de tissu ovarien. Développée par l'équipe de Kutluk Oktay à l'université de Yale (États-Unis) en 1999, l'autotransplantation de tissu ovarien congelé est déjà utilisée depuis une vingtaine d'années chez des femmes qui ont perdu prématurément la fonction ovarienne. Une conséquence de chimiothérapies, d'autres traitements ou de maladies endommageant les ovaires. Une partie du tissu ovarien leur est prélevée préventivement, puis réimplantée après le traitement pour rétablir l'équilibre hormonal et la fertilité naturelle. Récemment, cette équipe a montré que cette intervention pouvait aussi être proposée à des femmes en bonne santé… afin de repousser la ménopause. Le premier objectif de cette opération est de pallier la perte des facteurs hormonaux (œstrogènes et progestérone) qui peut déclencher une série de changements plus ou moins récurrents et souvent difficiles à supporter : bouffées de chaleur, altération du sommeil, anxiété et dépression, réduction du désir sexuel, perte de la masse musculaire (sarcopénie) et

ONCOLOGIE

Les traitements hormonaux sont-ils dangereux ?

« *La première crainte des femmes qui refusent de suivre un traitement hormonal lors de la ménopause est qu'il puisse engendrer un cancer du sein, ou stimuler sa progression* », lance le gynécologue Andrea Genazzani. Une crainte compréhensible sachant que le cancer du sein est la première cause de décès par cancer chez la femme en France, avec environ 60 000 nouveaux cas par an, dont 12 000 décès. Cette peur a été renforcée par un article publié en 2002 dans la revue médicale américaine *Jama*, qui établissait ce lien entre traitement hormonal et cancer du sein. Mais depuis sa publication, la plupart de ses données ont été invalidées. Ainsi, plusieurs travaux ont montré qu'en réalité, ces hormones n'augmentent pas significativement ce risque chez la plupart des femmes. Une réanalyse de l'ensemble de ces données, publiée en 2018, a ainsi mis en évidence que ce risque n'est avéré que chez les femmes de plus de 60 ans, et qu'il est inexistant lorsque le traitement débute au moment même du déclenchement de la ménopause, soit vers 50 ans. Par ailleurs, une très large étude française publiée en 2014, portant sur près de 80 000 femmes traitées, établit une distinction selon les hormones prescrites. Elle révèle que les femmes traitées avec de la progestérone naturelle ne courent aucun risque. Celui-ci serait exclusivement lié à la forme artificielle de cette hormone.

MICHELLE JACOBSON

« Chez la majorité des femmes, l'utilisation de progestérone naturelle ne montre aucun risque de cancer du sein »

Michelle Jacobson, gynécologue à l'hôpital Women's College, à Toronto (Canada)

« Chez la majorité des femmes, l'utilisation de progestérone naturelle ou de dydrogestérone [progestérone naturelle dont la forme est modifiée] *ne montre aucun risque de cancer de sein,* confirme Michelle Jacobson, gynécologue à l'hôpital Women's College (Canada) et professeure de gynécologie obstétrique à l'université de Toronto, qui a fait le point sur ce risque pour la Société canadienne de gynécologie obstétrique en octobre 2021. *Ce traitement hormonal est même conseillé pour les femmes à haut risque de cancer du sein, par exemple celles avec des mutations dans les gènes BRCA, car chez elles le risque de base est tellement élevé que le risque causé par le traitement est insignifiant. Ce traitement est uniquement déconseillé pour les femmes ayant déjà eu des cancers du sein, chez qui ces hormones augmentent le risque de récidive.* »

de la masse osseuse (ostéopénie)… Plus grave, ces effets sont également associés à une augmentation du risque d'ostéoporose et de maladies neurodégénératives ou cardio-vasculaires.

Ces dernières années, les avancées médicales ont déjà permis de repousser de quelques années cette échéance, qui intervient normalement entre 45 et 55 ans. Concernant la fertilité par exemple, grâce à la procréation médicalement assistée (PMA), une femme peut utiliser les ovocytes d'une autre femme — ou ses propres ovocytes préalablement congelés — et ainsi accoucher jusqu'à 60 ans, si son utérus est traité par des hormones afin de mener l'embryon à son terme. Quant à l'équilibre des hormones sexuelles, il peut être maintenu avec un traitement hormonal d'œstrogènes et de progestérone.

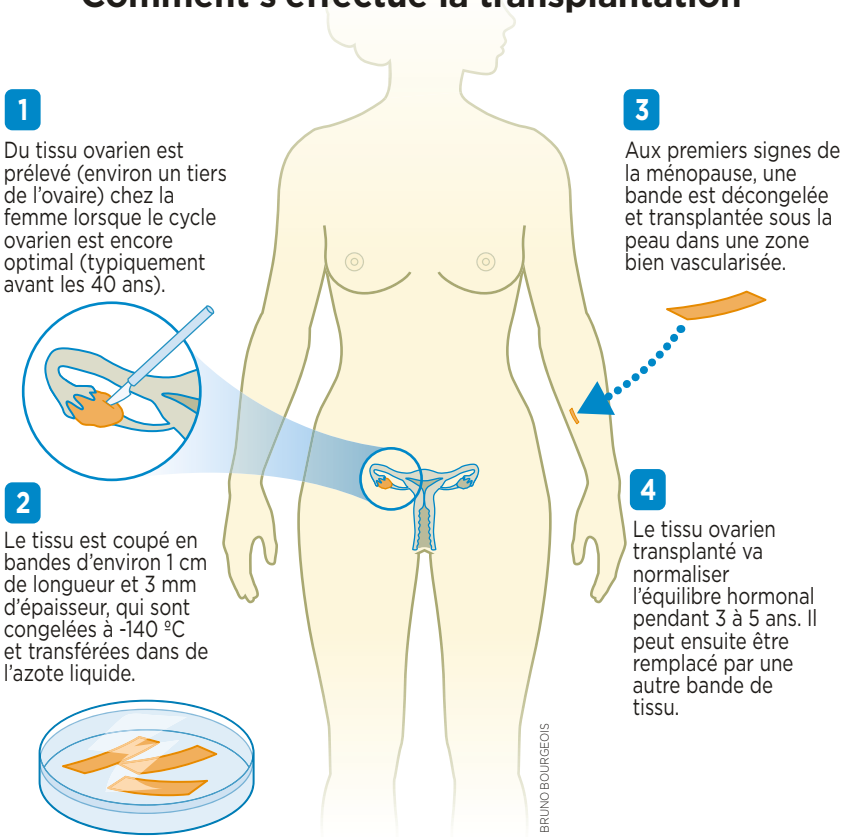
Une réduction de l'incidence de la maladie d'Alzheimer

« Le bénéfice du traitement hormonal est réel. Les femmes se sentent mieux et peuvent poursuivre leur vie comme avant la ménopause, affirme Andrea Genazzani, docteur en gynécologie obstétrique à l'université de Pise (Italie). *Cela réduit l'incidence de la maladie d'Alzheimer comme celle d'autres problèmes cognitifs, ainsi que l'incidence de pathologies cardio-vasculaires et l'ostéoporose. Si vous redonnez aux femmes un équilibre hormonal semblable à celui de leurs 40 ans, cela réduit la vitesse du vieillissement de certains organes spécifiques et donc augmente la durée de vie en bonne santé… voire la longévité, grâce à une réduction de la mortalité cardio-vasculaire !* » Malgré ces bénéfices, le traitement hormonal de la ménopause reste très minoritaire : selon l'Inserm, seules 8 à 10 % des femmes éligibles en France choisissent ce traitement. En cause, un risque accru de cancer du sein, qui pourtant ne concernerait qu'une minorité d'entre elles et uniquement avec certaines hormones artificielles *(lire l'encadré ci-contre).*

En rallongeant la production naturelle

TECHNIQUE

Comment s'effectue la transplantation



VIEILLISSEMENT

Des marqueurs génétiques de l'âge ovarien

Une analyse réalisée auprès de 200 000 femmes d'origine européenne, publiée en août 2021 dans la revue britannique *Nature*, a identifié 290 marqueurs génétiques liés au vieillissement des ovaires, dont la majorité est impliquée dans le système de réparation de l'ADN. Des marqueurs qui pourraient aider à estimer la vitesse de vieillissement ovarien et ainsi l'âge biologique de cet organe. Parmi ces marqueurs, la mutation ayant le plus grand lien avec l'âge biologique des ovaires est dans le gène CHEK2, qui code pour une protéine empêchant la réplication des cellules avec de l'ADN endommagé. Cette mutation inhibe la fonction de cette protéine et rallonge ainsi la durée de vie des ovocytes, retardant la ménopause d'environ 3,5 années. Cibler cette protéine pourrait donc être une possibilité supplémentaire de repousser la ménopause. À condition que cela ne porte pas préjudice à la fonction ovarienne.

des hormones sexuelles, les greffes de tissu ovarien proposées par l'équipe de Kutluk Oktay pourraient rassurer les femmes sur ce risque de cancer et leur permettre de repousser ainsi la ménopause. Mieux : il ne serait pas nécessaire de réimplanter le greffon directement dans les ovaires mais sous la peau des bras ou dans l'abdomen, où il fonctionne tout aussi bien. *« Il suffit de prélever à peu près un tiers du tissu ovarien, ce qui n'est pas assez pour enclencher une ménopause prématurée, et de le réimplanter avant l'arrivée naturelle de la ménopause, prolongeant ainsi l'équilibre hormonal naturel pendant trois à cinq années »*, explique le médecin. En novembre 2021, son équipe a ainsi montré dans un article publié dans le journal *Fertility and Sterility* que ces greffons avaient une durée de vie fonctionnelle d'environ 45 mois, soit près de quatre ans. Et les chercheurs prévoient que le tissu prélevé puisse être divisé en plusieurs morceaux réimplantés les uns après les autres (donc tous les trois à cinq ans) afin de remplacer le greffon en fin de vie et prolonger encore cette production hormonale naturelle.

Effectuer le prélèvement au bon moment

Pour l'heure, il ne s'agit encore que d'expérimentations. Avant de généraliser cette approche, il faudra aux chercheurs apprendre à estimer le moment adéquat pour réaliser le prélèvement, car le cycle ovarien varie d'une femme à l'autre. Ainsi, si le tissu est pris trop tard, la fonction ovarienne ne sera plus assurée. Ce choix du moment clé pourrait être facilité par des marqueurs génétiques *(lire l'encadré ci-contre)*. *« Je pense que ces transplants deviendront une approche normale dans le futur, car il s'agit d'une technique simple, pratique, facilement réalisable et avec de réels bénéfices,* avance Kutluk Oktay. *Il est temps que l'on ajuste le temps de la ménopause à la durée de vie plus longue des femmes aujourd'hui.* » Et ainsi, peut-être, les aider à vivre mieux, plus longtemps. ■

Cette machine produit de la peau sur mesure

Des chercheurs suisses sont parvenus à automatiser la fabrication de la peau autologue, produite à partir des propres cellules du patient. Une innovation qui bénéficiera dans l'avenir aux grands brûlés. Reportage dans le laboratoire de cette start-up prometteuse près de Zurich, en Suisse.

C'est l'organe le plus étendu et le plus lourd de notre corps : la peau recouvre 1,5 à 2 m² de surface et pèse environ 3,5 kg. Une enveloppe constituant un ultime rempart face aux agressions extérieures. Mais quand elle est gravement détruite, notamment chez les grands brûlés, les médecins sont démunis. La peau artificielle n'existe pas. Les greffes se heurtent aux problèmes de rejet. Seule approche réparatrice définitive validée à ce jour : l'autogreffe, c'est-à-dire le prélèvement d'un lambeau de peau à un endroit du corps épargné et peu visible (le cuir chevelu si possible), pour reconstruire les zones lésées. Mais face à des brûlures très étendues, le problème reste entier.

La greffe de peau est néanmoins sur le point de connaître une avancée spectaculaire : afin d'en disposer en toute sécurité, rapidement et en grande quantité, une équipe suisse a mis au point la première machine entièrement automatisée à fabriquer de la peau dite autologue, c'est-à-dire produite à partir des propres cellules du patient. Au départ : un petit centimètre carré de peau saine, de la taille d'un timbre-poste, soit 6 à 8 millions de cellules, prélevé chez le blessé sur une zone épargnée par la brûlure, derrière les oreilles par exemple. À l'arrivée, la machine denovoCast en produit plus de 100 fois plus, sous la forme d'un fin feuillet de peau reconstruite. Une nouvelle peau prête à être acheminée au bloc opératoire pour y être déposée par le chirurgien au contact même des zones lésées. Son ultime atout : elle n'est pas rejetée car créée sur mesure à partir des propres cellules de peau du patient.

Pour parvenir à ce résultat, un dispositif mobile de près de deux mètres de haut sur 1,20 m de large, bardé de câbles et de tubes souples œuvre durant 20 jours, 7 jours sur 7, 24 heures sur 24. À l'intérieur, les cellules cutanées du prélèvement se multiplient dans des conditions précises, définies par les travaux de bioingénierie cellulaire suisses.

Cette peau, denovoSkin, n'est pas encore commercialisée : sa mise sur le marché est prévue pour 2024. Elle n'est pour l'instant produite qu'ici, à Schlie-

CSEM CUTISS

« Nous avons démarré un essai clinique européen auprès d'une cinquantaine de patients »

Daniela Marino, cofondatrice de la start-up Cutiss (Schliegen, Suisse)

CSEM CUTISS

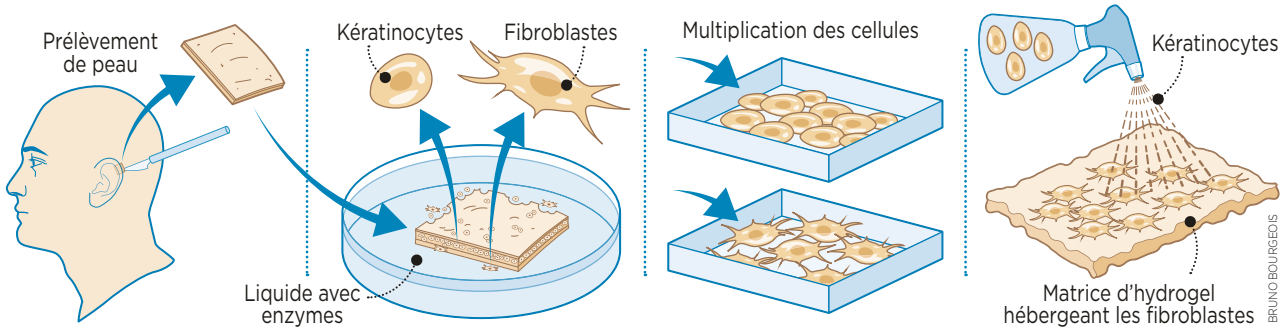
La « peau » complète est obtenue au terme de 20 jours de production 24 h sur 24 grâce à un dispositif automatisé (ci-contre) de multiplication des cellules cutanées.

ren, à quelques kilomètres de Zurich (Suisse), dans une salle du laboratoire de la start-up Cutiss créée en 2017. L'aventure a démarré en 2009 avec un projet universitaire mené à l'université de Zurich. L'objectif était déjà de produire de la peau autologue à partir des cellules du patient. Depuis, les travaux se sont poursuivis, en collaboration avec l'institut Wyss (Zurich, Suisse), un centre de recherche interdisciplinaire renommé, axé sur le développement de biomatériaux. La peau synthétisée par la machine a été testée en clinique afin d'établir son innocuité dans un essai clinique de phase 1 (qui valide le principe de l'opération) auprès de quelques patients brûlés, dont certains enfants, tous très sévèrement atteints. *« À la suite de ces premiers résultats et de l'excellent retour des chirurgiens, nous avons démarré un essai clinique européen auprès d'une cinquantaine de patients »*, précise Daniela Marino, cofondatrice et responsable de la start-up, désignée meilleure start-up helvète en 2020 par le top 100 Swiss Startup Award.

Quelle est la « recette » de fabrication de cette peau reconstruite autologue et complète, contenant deux couches de tissus, l'épiderme et le derme ? Tout d'abord, une fois la biopsie cutanée effectuée, le fragment de peau est soumis à des méthodes physiques et chimiques, c'est-à-dire des lavages répétés dans des bains d'enzymes, qui « digèrent » et séparent les deux feuillets épidermiques et dermiques. C'est la phase d'isolation, dont l'objectif est d'obtenir deux types de cellules. D'un côté les plus superficielles, les kératinocytes provenant de l'épiderme, de l'autre, les plus profondes, les fibroblastes. Pour l'étape suivante, il s'agit de faire se multiplier chaque type cellulaire séparément, en les conservant dans des incubateurs à 37 °C avec des milieux de culture adaptés permettant leur croissance. Il est alors possible de passer à l'étape de modélisation tissulaire, en créant, dans une matrice de gel de collagène, un support sur lequel les fibroblastes peuvent se développer. Une fois ce « néotissu » obtenu, il reste à ensemencer en surface les kératinocytes. Résultat : *« Un tissu reconstruit en labo-*

PROCESSUS

Comment reconstruire la peau



1 **Prélèvement**
1 cm² de peau saine est prélevé (par exemple derrière l'oreille).

2 **Isolation** (quelques heures)
La peau est placée dans un bain d'enzymes qui séparent les cellules kératinocytes et fibroblastes.

3 **Amplification** (5 jours)
Les deux types de cellules placés dans des milieux nutritifs distincts se multiplient.

4 **Construction du tissu** (15 jours)
Les fibroblastes se développent dans une matrice d'hydrogel sur laquelle on pulvérise des kératinocytes pour obtenir une peau.

ratoire comportant une couche épithéliale et une couche dermique simplifiée, détaille Vincent Ronfard, responsable scientifique de Cutiss. *Cette peau reconstruite n'est pas complète car elle ne comporte pas de poils ou de pigments, mais elle permet de sauver des vies humaines.* » Jusqu'à il y a encore quelques mois, le délai incompressible de fabrication, intimement lié aux temps de division des deux types de cellules, stagnait aux alentours de 30 jours. Or, en cas de brûlures profondes, dites du troisième degré *(lire l'encadré ci-dessous)*, d'importantes quantités de peau sont nécessaires rapidement. Pour accélérer la production, Cutiss a imaginé de l'automatiser, le procédé étant jusqu'ici réalisé manuellement en laboratoire. Elle a fait appel à une équipe de biologistes, de chimistes et d'ingénieurs située à Neuchâtel, au Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM). « *Dans un premier temps, nous avons dû décomposer toutes les étapes des gestes réalisés manuellement pour parvenir à les reproduire de manière automatique* », détaille Gilles Weder, qui dirige l'équipe. Pour cela, les scientifiques ont conçu une boîte transparente de polystyrène baptisée « graft box ». C'est dans ce petit volume étanche et fermé que se déroulent toutes les opérations, sans aucune intervention humaine extérieure. « *Grâce à l'automatisation et à l'amélioration des procédés, nous avons réduit de 25 % environ le temps de production et gagné sept à dix jours* », se félicite Vincent Ronfard. Sur la dernière version de la machine qui ne cesse d'être miniaturisée, quatre « boîtes » ont même pu être disposées en parallèle, permettant d'augmenter d'autant la production.

Aujourd'hui, les résultats prometteurs de phase 1, concernant notamment la sécurité du dispositif, la bonne prise de la greffe et l'absence d'infection, ont ouvert la voie à une phase 2 pour démontrer son efficacité. Celle-ci a déjà démarré en Suisse, mais aussi aux Pays-Bas et en Italie. À terme, la start-up prévoit même d'intégrer l'ajout de mélanocytes, les cellules responsables de la production de mélanine, le pigment naturel de la peau, afin de pouvoir la colorer et l'utiliser partout dans le monde. ■

Sylvie Riou-Milliot

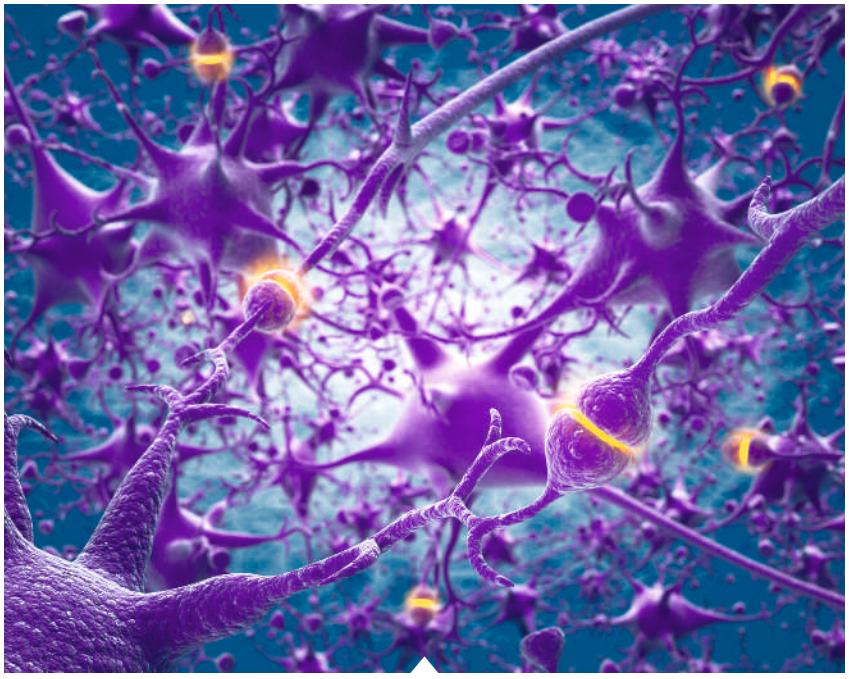
CLASSIFICATION

Les brûlures, degré par degré

La sévérité d'une brûlure se définit par le pourcentage de surface corporelle totale (total body surface area, TBSA) concernée mais aussi par sa profondeur, c'est-à-dire l'atteinte d'une ou de plusieurs des trois couches de la peau que sont l'épiderme — la plus superficielle —, le derme et l'hypoderme, la plus profonde. Les brûlures du premier degré touchent l'épiderme seul. Au deuxième degré, c'est le derme superficiel qui est atteint, la peau étant rouge, parfois avec des bulles. Le traitement consiste en une désinfection et en l'application de pommades grasses. À terme, ces brûlures ne laisseront pas ou peu de cicatrices. Contrairement à celles du troisième degré — où la peau devient blanche, rigide et cartonnée — qui relèvent, elles, d'une approche chirurgicale avec des greffes de peau qui devront être souvent répétées.

Pourquoi notre cerveau est si énergivore

Que l'on réfléchisse ou que l'on soit au repos, le cerveau compte pour 20 % de la consommation énergétique du corps humain. Une nouvelle observation explique ce phénomène.



SPRINGER MEDIZIN / SPL / SUCRE SALÉ

Libération de neurotransmetteurs dans les synapses (en jaune) par les neurones (vue d'artiste).

Des biochimistes américains de l'université Cornell à New York (États-Unis) ont probablement élucidé la raison pour laquelle notre cerveau dépense autant d'énergie. *« Le fait qu'il consomme 20 % de l'énergie disponible dans notre corps alors qu'il ne représente que 2 % de son poids restait jusqu'à présent un mystère »*, explique Gilles Bonvento, chercheur au Laboratoire des maladies neurodégénératives (CEA/CNRS/université Paris-Saclay), qui n'a pas participé à l'étude. Cette consommation se traduit par un besoin crucial en glucose sanguin, principale source d'énergie du cerveau. Ainsi, une légère hypoglycémie peut parfois provoquer un évanouissement. Plus mystérieux encore, les besoins énergétiques du cerveau semblent indépendants de l'activité mentale : ils sont similaires que l'on soit au repos ou en pleine réflexion et se maintiennent même chez les patients plongés dans le coma. Plusieurs mécanismes liés à l'activité propre aux cellules nerveuses avaient déjà été proposés pour expliquer ce métabolisme énergétique élevé. *« L'un des plus importants semble être celui du maintien de l'excitabilité électrique des milliards de neurones cérébraux qui leur permet de communiquer entre eux »*, précise Gilles Bonvento.

Une activité permanente des synapses en cause

Pourtant, des expériences effectuées par le passé ont montré qu'une part notable de la consommation d'énergie du cerveau avait une autre origine. Les chercheurs américains ont découvert qu'elle pouvait provenir d'une autre activité typique des neurones, celle qui leur permet de libérer leurs neurotransmetteurs au niveau des synapses, ces points de contact par lesquels ces cellules nerveuses communiquent entre elles. *« Les neurotransmetteurs sont d'abord concentrés dans des vésicules par une enzyme,* note Gilles Bonvento, *et l'étude montre que le maintien de ce processus, instable, s'avère particulièrement coûteux en énergie cellulaire. »*

Cette dépense énergétique est multipliée par le fait que des centaines de ces vésicules se retrouvent dans chaque synapse, que chaque neurone peut en comporter des milliers à sa surface, et que ces mêmes neurones se comptent par dizaines de milliards dans le cerveau. Au total, d'après les chercheurs, le maintien permanent de la capacité des neurones à libérer sur le champ leurs neurotransmetteurs représenterait une part élevée de la dépense énergétique du cerveau. *« Il s'agit d'une observation nouvelle,* confirme Gilles Bonvento. *Elle n'a porté que sur un type précis de neurones du cerveau, ceux de l'hippocampe, étudiés* in vitro, *aussi son importance au niveau de tout le cerveau reste à vérifier. »* ■

Pierre Kaldy

Les psychédéliques au chevet des troubles mentaux

LSD, MDMA, champignons, kétamine… Ces molécules provoquant des états modifiés de la conscience séduisent les psychiatres. Nombre d'essais sont lancés pour des pathologies comme les dépressions résistantes, les troubles du stress post-traumatique, voire certaines addictions.

« Trip-thérapie » : faire voyager l'esprit à l'aide de puissantes drogues hallucinogènes pour l'aider à se sortir de ses tourments. La stratégie peut encore paraître étonnante aux yeux du grand public. En psychiatrie pourtant, les molécules dites psychédéliques semblent définitivement sorties de la marginalité. D'origine naturelle (ayahuasca, peyotl, champignons, mescaline) ou synthétique (LSD, MDMA), les psychédéliques induisent des états modifiés de la conscience avec une acuité sensorielle fortement amplifiée et désorganisée. Longtemps bannies de la recherche par une réglementation très stricte, ces molécules opèrent un retour en force depuis le début des années 2000, notamment parce que les médecins ont dû reconnaître que la pharmacopée psychiatrique limitée dans ses mécanismes d'action s'avérait inefficace pour nombre de patients. Depuis, le nombre d'essais et d'indications potentielles va croissant : dépressions résistantes aux antidépresseurs classiques, troubles du stress post-traumatique *(lire l'encadré p. 72)*, addictions voire troubles obsessionnels compulsifs (TOC) ou symptômes anxio-dépressifs chez les patients en fin de vie…

« Ce sont des pistes extrêmement intéressantes et prometteuses parce qu'il s'agit de produits qui peuvent avoir une action rapide avec des mécanismes différents de ceux qu'on a explorés jusqu'à présent », confirme le Pr Bruno Aouizerate, psychiatre au Bordeaux Neurocampus. Pour le Pr Laurent Karila, psychiatre à l'hôpital Paul-Brousse à Villejuif, qui s'y intéresse, lui, pour le traitement des addictions *(lire l'encadré p. 73)*, *« les molécules psychédéliques semblent avoir des caractéristiques singulières puisqu'elles agissent rapidement, intensément et constituent généralement une expérience marquante pouvant augurer d'une évolution favorable »*.

Mais c'est bien dans la dépression que ce regain d'intérêt pour la « médecine

CONTEXTE

Le terme « psychédélique » a été formé au milieu des années 1950 à partir du grec ancien *psyché* (âme, esprit) et *deloun* (révéler, faire voir) pour décrire l'expérience psychique intense provoquée par l'absorption de LSD, synthétisé par le chimiste Albert Hoffman pour les laboratoires Sandoz, mais aussi d'autres molécules d'origine naturelle (ayahuasca, peyotl, champignons, mescaline) ou synthétique (MDMA). Très étudiées entre 1950 et 1970, ces molécules ont été interdites pour contrer les dérives d'un usage récréatif. Jusqu'à la renaissance de la recherche psychédélique en psychiatrie au début des années 2000.

ILLUSTRATION OLIVIER BALEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

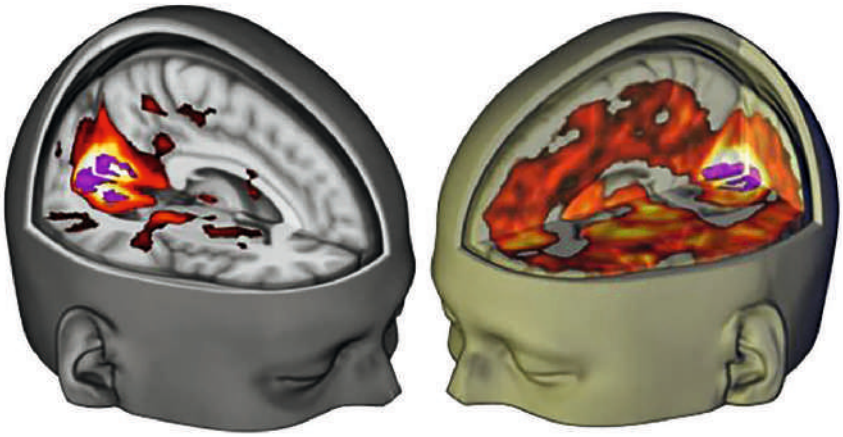
psychédélique » est le plus avancé. En témoigne l'autorisation et le remboursement accordés en France fin 2020 à l'ésketamine pour le traitement des formes résistantes aux antidépresseurs. Commercialisée sous le nom de Spravato par le laboratoire Janssen, la molécule est très proche de la kétamine utilisée en chirurgie comme anesthésiant général… et détournée pour un usage récréatif en raison de ses effets hallucinogènes puissants. *« Le Spravato est un produit exceptionnel qui est complètement entré dans la boîte à outils des centres impliqués dans la prise en charge des patients résistants »*, reconnaît Bruno Aouizerate, lui-même responsable des centres Experts dépression résistante de la Fondation FondaMental. *« Administré très facilement par spray nasal, il est très bien toléré avec très peu d'effets secondaires : parfois des maux de tête et une légère augmentation de la pression artérielle. Les patients reçoivent le traitement en centre uniquement et sont surveillés pendant environ deux heures avant de repartir. »* En France, l'Assurance-maladie estime que près de 10 % des personnes de 18 à 75 ans connaissent un épisode de dépression

chaque année. Or, au moins 30 % des patients sont résistants aux antidépresseurs… Dans le monde, cela correspond à environ 100 millions de personnes. « *Dans la dépression, il faut bien voir que depuis cinquante ans, à peu de chose près, on tourne toujours autour des mêmes produits*, rappelle l'expert. *Ça veut dire que ces nouvelles molécules sont absolument essentielles.* »

Des thérapies assistées sous hallucinogène

Mais d'autres psychédéliques sont prêts à faire leur entrée dans la pharmacopée psychiatrique. C'est en particulier le cas de la psilocybine, la substance psychoactive des champignons hallucinogènes, qui a vu le nombre de publications scientifiques lui étant consacrées décupler en seulement dix ans : 26 en 2012, 54 en 2017, 205 en 2021… L'un des essais cliniques remarquables cette année-là a été publié dans la très sérieuse revue *JAMA Psychiatry* par le Centre pour la recherche sur les psychédéliques et la conscience de l'Institut Johns-Hopkins, à Baltimore (États-Unis). Sur une trentaine de patients souffrant d'un épisode dépressif majeur, les chercheurs ont montré qu'un protocole de deux séances de thérapie assistée sous l'hallucinogène (20 puis 30 mg de psilocybine en gélule) permettait une rémission d'au moins un mois comparé à celui du parcours classique, où le score de dépression se dégradait rapidement. Concrètement, des séances de préparation sont programmées en amont, avant que le patient ne vienne s'installer confortablement sur un canapé dans un environnement semblable à un salon pour un *trip* (voyage) d'environ trois heures sous la supervision de son thérapeute. Équipé d'un cache-yeux et d'écouteurs permettant de diffuser de la musique, il est guidé pour explorer ses expériences et sentiments à l'aune d'un état de conscience modifié par la drogue.

Si le nombre de patients inclus reste modeste, les petits essais de ce type aux résultats prometteurs se sont multipliés. Aux États-Unis, ce nouveau mouvement thérapeutique est tel que start-up et biotechs anticipent déjà l'assouplissement des réglementations. Certaines se concentrent sur le développement de molécules de qualité pharmaceutique, tandis que d'autres se placent sur la prise en charge. En tout, près de 50 sociétés ont ainsi investi le domaine (Field trip, Gilgamesh Pharmaceutical, Diamond Therapeutics…), dont une trentaine sont



IMPERIAL COLLEGE LONDON

À l'IRM cérébrale, comparés à ceux d'un placebo (à gauche), les effets du LSD se traduisent par une hyperconnexion des réseaux de neurones (à droite), en particulier avec le cortex visuel (en violet).

ESSAI CLINIQUE

Quand l'ecstasy efface le stress post-traumatique

Contre les troubles du stress post-traumatique, c'est la MDMA, molécule psychostimulante de l'ecstasy qui a récemment démontré sa pertinence. Ses principaux effets peuvent se résumer à un état d'euphorie, des émotions ressenties de façon plus intense, un désir de communiquer et de sociabiliser plus vif… et une réduction des sensations de peur. Un essai clinique de phase 3, publié dans *Nature* en mai 2021 par les équipes du département de neurologie de l'université de Californie à San Francisco (États-Unis), a ainsi montré que la thérapie assistée par MDMA était très efficace chez les personnes victimes de cette souffrance psychique consécutive à un traumatisme (vétérans de guerre, victimes d'attentats…). Le principe est de confronter les patients à leur souvenir traumatique lors d'un échange préparé avec le thérapeute alors qu'ils sont sous l'effet de cette drogue afin de modifier la perception de leur propre mémoire. Deux mois après la séance, 67 % des patients du groupe traité ne présentaient plus aucun symptôme de stress post-traumatique, contre 32 % chez le groupe placebo. L'Agence américaine de régulation du médicament a demandé un deuxième essai clinique positif pour confirmer ces résultats. L'autorisation pourrait intervenir dès 2023.

PR LAURENT KARILA

PSYCHIATRE AU CENTRE D'ENSEIGNEMENT, DE RECHERCHE ET DE TRAITEMENT DES ADDICTIONS, HÔPITAL PAUL-BROUSSE - UNIVERSITÉ PARIS SACLAY - UR PSYCOMADD

« Une révolution dans le traitement des affections psychiatriques »

JENNIFER PARPETTE, CC 4.0

“À ce jour, on peut retenir 18 études qui ont évalué l'efficacité des psychédéliques pour traiter les troubles addictologiques : quatre dans celui lié à l'usage de l'alcool, cinq dans celui lié au tabagisme, une dans le trouble lié à l'usage d'opioïdes, deux contre l'usage du cannabis et deux dans le trouble lié à l'usage de psychostimulants… Toutefois, la plupart de ces études sont rétrospectives, observationnelles et descriptives, entraînant des biais de sélection et de mémorisation, plus limitées que celles comparant une molécule à un placebo. Elles doivent donc être confirmées. Malheureusement, la recherche en France sur ces substances est encore freinée par une législation très restrictive, mais on espère que cela va bouger. Nous avons monté un consortium de recherche avec notre équipe Psycomadd et d'autres équipes pour proposer des protocoles de recherche dans différentes indications, à la fois psychiatriques et addictologiques. Les psychédéliques pourraient être une véritable révolution dans le traitement des affections psychiatriques et addictologiques pour lesquelles les traitements actuellement disponibles mettent le plus souvent plusieurs semaines à agir, sont partiellement efficaces, et dont l'interruption peut se solder par une rechute.”

cotées en Bourse. Le plus large essai randomisé en cours sur la psilocybine contre la dépression, mené auprès de 233 patients, est ainsi conduit par la biotech britannique Compass Pathways, qui a communiqué des résultats préliminaires pour son produit en novembre dernier : tous les feux sont au vert. Si bien qu'un essai de phase 3 — la dernière avant une éventuelle autorisation des autorités sanitaires — débutera dans les prochaines semaines.

Un phénomène de « redémarrage cérébral »

Reste à comprendre comment ces puissants psychotropes semblent agir contre les troubles mentaux. Pour cela, ce sont leurs effets sur le cerveau qui sont attentivement observés. À l'imagerie cérébrale, les études menées sur la psilocybine et le LSD mettent en lumière une hyperconnectivité des réseaux de neurones qui n'ont pas l'habitude de communiquer en temps normal. C'est le cas du cortex visuel *(voir l'illustration p. 72)* particulièrement stimulé et qui tisse des connexions fortes avec les réseaux de l'ouïe ou du mouvement. À l'inverse, *« les neurones qui travaillent habituellement ensemble se désynchronisent,* explique David Nutt, spécialiste des psychédéliques à l'Imperial College London (Royaume-Uni). *Un phénomène que nous avons corrélé à une dissolution de la conscience de soi déclarée par les participants.* » En d'autres termes, le cerveau échappe à ses méthodes de travail habituelles par une désynchronisation extrême de son activité. Après l'expérience, les patients décrivent souvent un sentiment de « redémarrage cérébral ». Une sorte d'électrochoc chimique ciblant la sérotonine, neurotransmetteur fortement impliqué dans la régulation de l'humeur, qui induirait ainsi un surcroît de plasticité cérébrale, permettant au cerveau de se réorganiser pour estomper les troubles dont il souffre.

Tout cela, à condition d'être bien encadré. En effet, si le risque d'addiction est quasiment nul et les effets secondaires rares, ces substances peuvent toutefois révéler des vulnérabilités psychiques latentes, comme des troubles psychotiques chroniques de type schizophrénie. Reste que de plus en plus de psychiatres n'hésitent plus à parler de révolution pour la pharmacopée des troubles mentaux. ■

Hugo Jalinière @hugojaliniere

Le retour en force du café

Source d'antioxydants, cette boisson cumule les avantages nutritionnels, à condition de la consommer en quantités modérées et pas trop sucrée.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Expresso, long, décaféiné… Le café est un rendez-vous incontournable de notre quotidien. 62 % des Français en prennent au petit déjeuner et 47 % à la pause méridienne (1). Durant les confinements et la généralisation du télétravail, il a même connu un regain d'intérêt — en volume comme en valeur — sous l'impulsion de nouvelles références « pure origine ». Le chiffre d'affaires des cafés torréfiés en grains a ainsi augmenté de 38 % entre 2020 et 2021. Le café met aussi son petit grain dans les smoothies et le kombucha (le « coffbucha »), une boisson fermentée à partir d'un champignon du même nom. Sans parler de nouvelles tendances comme le *cold brew*, très populaire en Asie, qui n'est rien d'autre qu'un café infusé à froid, ou encore le *butter coffee* (café au beurre) qui séduit les Américains depuis quelques années.

Le café est bénéfique à bien des égards pour la santé, à condition de le consommer en quantités modérées et pas trop sucré ! Pour mémoire, un seul morceau de sucre équivaut à 20 calories (pour des recommandations quotidiennes de 1800 à 2200 calories chez la femme et 2400 à 2600 chez l'homme).

Il est riche en antioxydants

Selon une étude Nutri-net Santé, le café est la première source alimentaire des Français en polyphénols, de puissants antioxydants. Il représente ainsi 36,9 % (soit 317 mg/jour pour les hommes et 298 mg/jour pour les femmes) des apports totaux quotidiens en polyphénols, contre 33,6 % pour la consommation de thé vert ou noir, 10,4 % et 6,7 % pour celles du chocolat et des fruits. Les polyphénols les plus abondants dans le café sont des acides chlorogéniques (acides 5-caféoylquinique et feruloylquinique). Toutefois, mieux vaut consommer des grains blonds ou brun clair car la torréfaction réduit la teneur en antioxydants (2). Le café renferme aussi des vitamines du groupe B et des minéraux (calcium, potassium, magnésium).

Des teneurs variables en caféine

La teneur en caféine diffère selon la température et le temps de tor-

3,4 kg
de café

ont été consommés en moyenne par Français en 2020, soit deux fois moins que les Néerlandais (8,3 kg en moyenne), les plus gros consommateurs mondiaux.
(SOURCE: STATISTA.)

TORRÉFACTION Action de cuire, chauffer, griller le grain de café vert de façon à le transformer en grain brun et révéler ses arômes.

ARABICA Arbuste originaire des hauts plateaux éthiopiens. On le distingue du caféier robusta poussant en Côte d'Ivoire, au Congo et en Ouganda.

CAFÉINE Alcaloïde de la famille des méthylxanthines agissant comme stimulant psychotrope et présent dans le café, le thé et les boissons énergisantes.

réfaction, la variété, le niveau de mouture et le mode de préparation du café. Ainsi, les grains arabica contiennent moins de caféine (1,2 %) que ceux de robusta (2,2 %). En moyenne, compter 90 mg de caféine pour une tasse de 20 cl de café filtre ; c'est plus qu'un expresso (6 cl) qui en contient 80 mg (3). Cette différence s'explique par le temps de préparation plus long du café filtre (5 minutes), ce qui lui permet de mieux infuser. Selon l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa), les adultes en bonne santé peuvent consommer sans risque pour la santé jusqu'à 400 mg/jour de caféine (soit l'équivalent de cinq expressos) et 200 mg/jour pour les femmes enceintes et allaitantes.

Il réduit la fatigue et la douleur...

La caféine est absorbée en moins d'une heure dans l'intestin grêle et se diffuse dans tous les tissus. Chez les adultes, sa demi-vie — le temps qu'il faut pour que le corps élimine 50 % de la caféine — varie de trois à sept heures (4). La structure moléculaire de la caféine est similaire à celle de l'adénosine, un neurotransmetteur qui ralentit l'activité nerveuse, réduisant de ce fait l'éveil et facilitant le sommeil. En se liant à ses récepteurs, la caféine va alors inhiber ses effets. Ainsi, à des doses modérées (40 à 300 mg), elle réduit la fatigue, augmente la vigilance et diminue le temps de réaction environ vingt minutes après son ingestion. En outre, 100 à 130 mg de caféine ajoutés à un analgésique contribueraient à soulager la douleur (5). Mais prudence : consommer son café à plus de 60 °C augmente le risque de développer un cancer de l'œsophage.

... mais il nuit au sommeil

La caféine réinitialiserait l'horloge interne de l'organisme, c'est-à-dire l'ensemble des signaux moléculaires qui maintiennent son fonctionnement et celui des cellules, calé sur un cycle de 24 heures. Ainsi, boire un double expresso trois heures avant le coucher retarderait d'environ quarante minutes l'horloge biologique (6). Par ailleurs, selon une étude réalisée par un centre de recherche américain sur le sommeil menée sur des personnes sans troubles du sommeil, boire quatre à cinq tasses de café (soit environ 400 mg de caféine) jusqu'à six heures avant le coucher réduirait de plus d'une heure la durée du sommeil (7). En outre, boire un café au lait peut compliquer la digestion chez certaines personnes.

Un possible allié du cœur

D'après une méta-analyse, boire une seule tasse de café par jour serait associé à une diminution du risque d'insuffisance cardiaque à long terme. En revanche, l'étude suggère que le café décaféiné pourrait causer l'effet inverse (8).
En outre, boire une tasse de café par jour (15 cl) réduirait le risque global de décès d'environ 22 % chez les personnes ayant des antécédents d'infarctus du myocarde par rapport à celles qui ne consomment pas régulièrement de café. Les participants sans antécédent cardio-vasculaire qui consomment une ou plusieurs tasses de café par semaine ont un risque de décès toutes causes confondues réduit de 14 % par rapport aux personnes qui ne consomment pas de café (9). ■

Sylvie Boistard @syboistard

CHRISTOPHE BERNARD
Directeur de recherche Inserm, à Marseille

Les effets sur le cerveau dépendent de l'âge

« Il a été démontré chez l'animal et l'humain que la caféine retarde la diminution des capacités cognitives liées au vieillissement, y compris dans la maladie d'Alzheimer où elle ralentit l'évolution de la pathologie. En revanche, la caféine peut avoir des effets néfastes sur le cerveau des fœtus, car ils sont dépourvus de l'enzyme qui la dégrade. Nous avons ainsi montré chez la souris que la caféine diminue, à la naissance, la vitesse de migration de certains neurones. »

(1) Ifop 2018.

(2) The effect of roasting on total polyphenol and antioxidant activity of coffee, Bobková A et al, *J Environ Sci Health*, 2020.

(3) Efsa.

(4) The Safety of ingested Caffeine: A Comprehensive Review, Temple JL. et al, *Frontiers in Psychiatry,* 2017.

(5) Coffee, Caffeine, and Health, Van Dam RM. et al, *The New England Journal of Medicine*, 2020.

(6) Effects of caffeine on the human circadian clock *in vivo* and *in vitro*, Burke TM. et al, *Science Translational Medicine*, 2015.

(7) Caffeine effects on sleep taken 0, 3, or 6 hours before going to bed, Drake C. et al, *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 2013.

(8) Association Between Coffee Intake and Incident Heart Failure Risk, Stevens LM. et al, *Circulation*, 2021.

(9) Green Tea and Coffee Consumption and All-Cause Mortality Among Persons With and Without Stroke or Myocardial Infarction, Teramoto M. et al, *Stroke*, 2021.

ALAIN JOCARD - AFP

L'exercice physique d'intensité modérée, comme ici le tai-chi, apparaît bien avoir un effet à court terme sur des états d'anxiété selon une étude de l'Inserm (2008).

Cinq questions pour mieux gérer le stress

Pour lutter contre les effets néfastes du stress chronique sur la santé, il faut d'abord apprendre à en reconnaître ses manifestations. Et opter pour des solutions concrètes et adaptées.

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

1 Comment distinguer le bon du mauvais stress ?

Le stress est la réponse physiologique — c'est-à-dire normale — de notre organisme pour s'adapter à une situation inattendue. Elle peut s'avérer cruciale pour éviter un accident ou pour mobiliser le meilleur de ses capacités lors d'un rendez-vous important. Le responsable de son déclenchement est le cerveau : dans certaines situations, il active le système nerveux autonome (qui contrôle les fonctions non volontaires du corps comme la respiration) et stimule la sécrétion d'hormones telles que l'adrénaline et le cortisol. Conséquences : accélération du rythme cardiaque, augmentation du tonus musculaire et de la pression sanguine, élévation du taux de sucre et de graisses dans le sang, ralentissement des fonctions digestives… À court terme, ce « bon stress » permet de mobiliser toutes les ressources physiques et cognitives nécessaires pour réagir face à un danger par exemple. En revanche, s'il s'inscrit dans la durée, il devient un « mauvais stress ». Celui-ci peut alors être associé à une fatigue accrue, à des troubles du sommeil ou de l'humeur, à une somatisation (maux de ventre, de tête ou de dos par exemple), à une anxiété et à des troubles cognitifs. Si ces manifestations se cumulent et perdurent, elles doivent inciter à réagir. Car un stress chronique a des conséquences négatives sur la santé sur le long terme.

2 Quels sont ses effets démontrés sur la santé ?

Parce que le stress affecte le fonctionnement de notre organisme, il peut être un facteur de risque important de certaines pathologies lorsqu'il s'installe de façon chronique. En 2009, une étude de l'université de Copenhague (Danemark), publiée dans *The Journal of Internal Medicine,* a montré qu'il existe un lien entre stress et diabète, mais aussi avec des maladies cardio-vasculaires telles que l'hypertension et la maladie coronarienne (dépôt de plaques d'athérome dans les artères qui irriguent le cœur). Cela a été confirmé par de multiples études, dont une publiée en 2019 dans *The British Medical Journal.* Des chercheurs islandais et suédois y montraient que le stress chronique augmente de 60 % le risque global de maladies et accidents cardio-vasculaires. Par ailleurs, en collaboration avec des Britanniques et des Finlandais, une équipe Inserm du Centre de recherche en épidémiologie et santé des populations (Villejuif, Val-de-Marne) a révélé en 2013 dans *The European Heart Journal* que parmi les personnes stressées, celles qui pensent que leur état peut avoir un impact sur leur santé ont deux fois plus de risque que les autres d'avoir une crise cardiaque.

Au premier semestre 2021, 54 % des Français déclaraient avoir ressenti du stress.
SOURCE : SONDAGE IFOP POUR FITBIT, JUIN 2021.

3 Sommes-nous tous égaux face au stress ?

Non, certains y sont plus sensibles que d'autres, et ce pour des raisons tant innées qu'acquises. Ainsi, des études

Arkopharma
LABORATOIRES

L'intelligence de la nature pour votre santé

ARKOPHARMA N°1 de la PHYTOTHÉRAPIE en FRANCE*

ARKOGÉLULES® RHODIOLE

NOTRE EXIGENCE PHYTO

UNE CONCENTRATION OPTIMALE EN ACTIFS CIBLÉS

pour aider à la relaxation et à la détente.

Hautement concentré
à 17 mg de rosavines

Complément alimentaire disponible dans votre pharmacie

- Plante d'origine MAÎTRISÉE
- Titrage GARANTI
- Gélules 100% VÉGÉTALES
- SANS colorant ni additif chimiques
- Fabriqué en FRANCE
- Convient aux VEGANS

ArkoClub Rejoignez notre programme fidélité - **www.arkoclub.fr**

Trouvez votre plante avec : myphytopartner.com

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE. WWW.MANGERBOUGER.FR

*35592 - *IQVIA - PharmaOne Pharmatrend & Paratrend - Marché des compléments alimentaires en Pharmacies et Parapharmacies des références de phytothérapie de la classe OTC 18 - Année 2020 - en valeur et volume.

AVIS D'EXPERT

PR NICOLAS FRANCK,
PSYCHIATRE AU CENTRE HOSPITALIER LE VINATIER (LYON)*

« Contraintes et incertitudes sont des facteurs majeurs de stress »

DR

Comment évaluer l'effet de la crise sanitaire sur le niveau de stress de la population ?
On peut le faire de deux manières : en mesurant l'incidence des troubles psychiatriques ou en s'intéressant à la santé mentale de la population en tant que capital qui peut se dégrader. Le bien-être mental des Français s'est altéré dès le premier confinement et n'a pas arrêté de se s'affaiblir au fil des épreuves successives.

La vague 28 de l'étude CoviPrev (étude en population générale pour suivre l'évolution des comportements — gestes barrières, alimentation, activité physique… — et de la santé mentale) menée début octobre 2021 par Santé publique France a révélé que 26 % des Français montraient des signes d'un état anxieux, soit 12 points de plus que le niveau hors épidémie, et 7 points de plus par rapport à la mi-juillet 2021.

Comment expliquer cette évolution ?
Le stress a augmenté pour différentes raisons. Au départ, à cause de la peur de la maladie et de la mort. Puis sont arrivées les contraintes sociales et physiques, les restrictions de liberté, de liens sociaux et d'accès à la culture notamment. Sans compter que les règles changent régulièrement et que nous ne savons jamais vraiment pour combien de temps elles vont s'appliquer. Or, contraintes et incertitudes sont des facteurs majeurs de stress.

Que faut-il en retenir ?
Que la santé mentale est une donnée essentielle lors d'une telle crise sanitaire et qu'elle ne doit surtout pas être négligée. Concrètement, cela signifie que les autorités sanitaires doivent communiquer à son sujet, donner des conseils pratiques à la population pour se prémunir du stress et des ressources à solliciter lorsque notre santé mentale se dégrade. ■ **Propos recueillis par É. G.**

* Auteur de *Covid-19 et détresse psychologique. 2020 l'odyssée du confinement*, Odile Jacob, 2020.

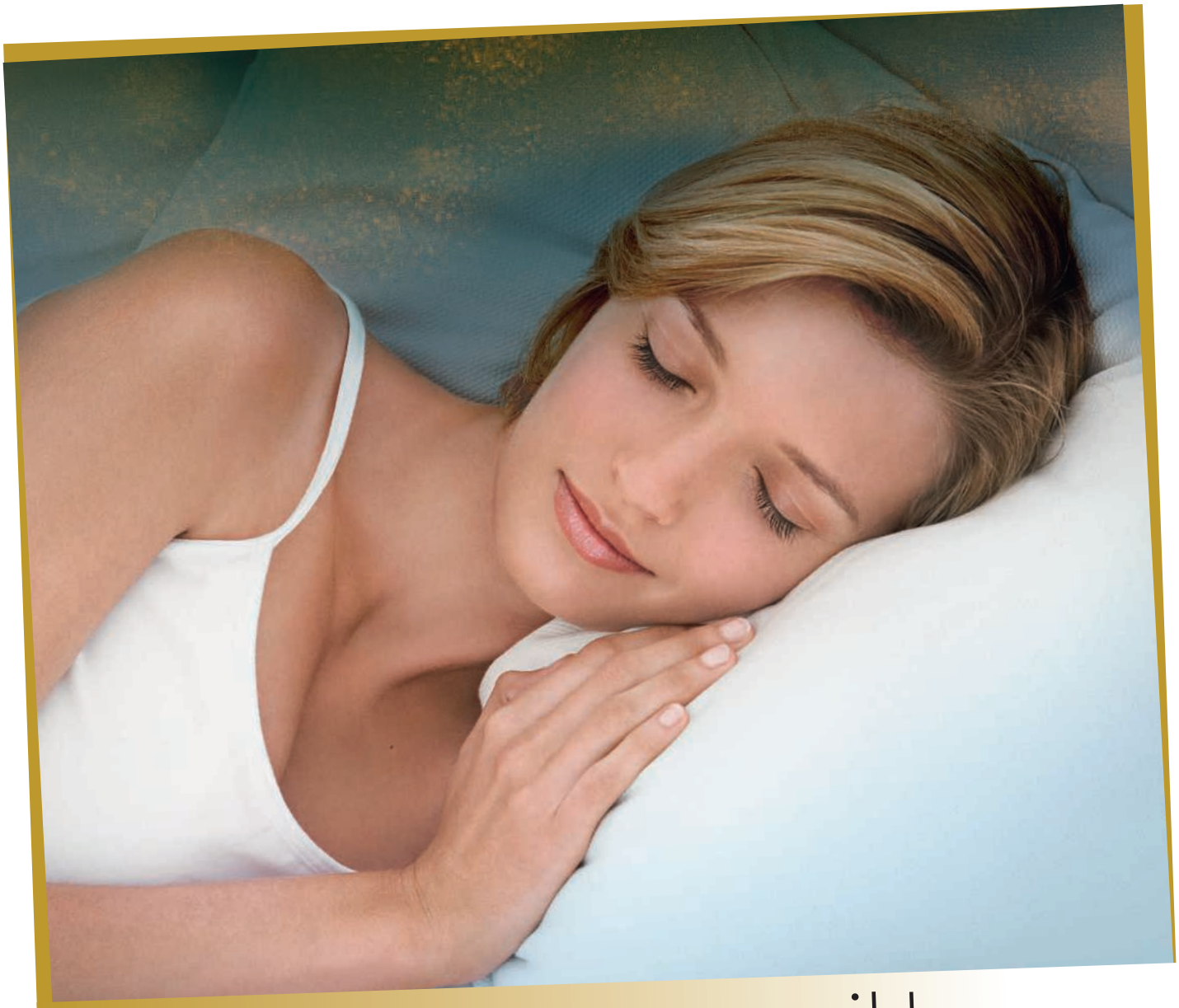
psychosociales suggèrent qu'une exposition au stress durant les premières années de vie augmenterait ensuite la sensibilité à l'âge adulte.
Par ailleurs, les effets du stress chronique peuvent venir s'ajouter à des facteurs de comorbidité : une étude publiée dans *Diabetes Care* en 2016, réalisée par une équipe américaine qui a suivi pendant 5 ans plus de 22 000 personnes dont 4000 diabétiques, montre que *« le stress comorbide ou les symptômes dépressifs sont courants chez les personnes atteintes de diabète et, ensemble, sont associés à des risques progressivement accrus d'issues cardio-vasculaires défavorables.* » Mais certaines personnes revendiquent leur besoin de ressentir le stress, par exemple pour travailler avec davantage d'efficacité. Même si cette nécessité est bien gérée au niveau psychique, elle s'accompagne néanmoins de risques pour la santé sur le long terme.

4 L'activité physique a-t-elle un impact sur cet état ?

Si elle est pratiquée de façon modérée et régulière, l'activité physique est un bon moyen de lutter contre le stress. Elle stimule en effet la production d'endorphines dans le cerveau, ce qui a pour effet de réduire le stress et l'anxiété. Elle lutte aussi directement contre ses effets néfastes sur la santé, au niveau cardiovasculaire notamment. Mais attention à ne pas trop en faire. Ainsi, dans une expertise collective publiée par l'Inserm en 2008 sur les effets sur la santé de l'activité physique, on peut lire que *« l'exercice physique d'intensité modérée apparaît bien avoir un effet à court terme sur des états d'anxiété chez des populations non pathologiques ou pathologiques et peut être utilisé pour diminuer ce vécu. Mais la pratique physique intensive apparaît au contraire pouvoir déclencher rapidement une augmentation de l'anxiété d'état et provoquer des réactions de stress chez des populations anxieuses, en faible condition physique ou âgées.* »

5 Est-il contagieux ?

Oui, et cela a certainement sauvé la vie de nos ancêtres à plus d'une reprise face à des prédateurs ! Mais dans les sociétés modernes, cette contagiosité du stress est plutôt devenue un problème. En 2007, des chercheurs allemands ont publié dans *Scientific Reports* une étude décryptant les mécanismes de ce stress transmis, expliquant notamment que la contagion existe en dehors même de toute verbalisation, et qu'elle est plus importante chez les personnes qui se montrent par ailleurs plus empathiques. Rappelons d'ailleurs que la prise en charge du stress repose aujourd'hui essentiellement sur un accompagnement psychologique et comportemental. Et qu'en dehors d'un état dépressif ou de stress post-traumatique, les médicaments n'ont pas démontré leur intérêt. Pas plus que les suppléments alimentaires ou la phytothérapie. ■



Solgardez votre sommeil !

Le flacon d'or Solgar contient de la mélatonine qui contribue à réduire le temps d'endormissement et les effets du décalage horaire.

En pharmacies et magasins de diététique.

SOLGAR
Since 1947

Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour. www.mangerbouger.fr

Solgar.fr

EIMAWA / UNIVERSITÉ DE MILAN

L'égyptologue Patrizia Piacentini (à droite), au chevet d'une des momies découvertes dans la nécropole d'Assouan.

Égypte
La colline des morts dévoile ses secrets

Utilisée pendant près de 1000 ans, la nécropole d'Assouan, au sud de l'Égypte, est une mine d'or pour les archéologues. Car ce cimetière aux portes de l'Afrique a été la dernière demeure de populations cosmopolites, Égyptiens, Nubiens, Perses, soldats grecs et même mercenaires judéens. Reportage de notre envoyée spéciale.

Par Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

Du sable brûlant à perte de vue, un thermomètre bloqué à 42 °C, des familles égyptiennes entières qui barbotent tout habillées dans les eaux millénaires du long fleuve nourricier. Sur les bords du Nil à la hauteur d'Assouan, tout au sud de l'Égypte, rien ne laisse entrevoir la présence de l'immense nécropole que dissimulent les dunes. Pourtant, c'est bien au pied de la « colline des morts » de l'antique Syène des Grecs, qu'accoste le bateau, face à l'île Éléphantine. Un imposant relief surplombé, d'un côté, par les épaisses murailles du monastère de Saint-Siméon (Deir Amba Samaan),

l'un des plus importants monuments de l'architecture chrétienne égyptienne du VI^e^ siècle, et de l'autre, par le célèbre mausolée où repose depuis 1959 l'Aga Khan III, Mohamed Chah (1877-1957), le chef des ismaéliens, un courant de l'islam chiite. Sous la montagne de sable, des sépultures rupestres ont été creusées pendant des siècles dans la falaise marneuse (*tafla*). « *Cette immense nécropole, l'une des plus vastes d'Égypte, couvre plus de 100 000 m², mais nous nous concentrons sur un secteur de 25 000 m², la partie où ont été localisées plus de 300 tombes* », détaille l'archéologue italienne Patrizia Piacentini. Professeure d'égyptologie à l'université de Milan (Italie), elle codirige

depuis 2018 la mission égypto-italienne à l'est d'Assouan (Eimawa) consacrée à l'étude de cette colline des morts, et son occupation. *« Ce cimetière a été utilisé pendant près de 1000 ans ! »*, précise la spécialiste qui boucle à peine sa troisième saison de fouilles. Un cimetière « aux portes de l'Afrique », dernière demeure des populations cosmopolites qui vécurent dans cette région frontalière de l'Égypte, entre le VII^e siècle avant J.-C. et le III^e siècle de notre ère.

EIMAWA / UNIVERSITÉ DE MILAN

Dans la tombe 26 de la nécropole (ci-dessus), du cartonnage polychrome enveloppant les pieds d'une momie (ci-contre), a été mis au jour.

Une zone frontalière à la croisée de nombreuses routes

Au VII^e siècle avant J.-C., l'Égypte des grands pharaons telle qu'on se la représente communément, celle des Akhenaton, Toutankhamon ou encore Ramsès II, n'est déjà plus depuis longtemps, et de grands épisodes de troubles ont secoué le pays. Toutefois, après la fragmentation du pouvoir égyptien au VIII^e siècle avant notre ère et les règnes des souverains nubiens — les pharaons noirs du pays de Koush — autant que sous la pression des Libyens ou des Assyriens, l'Égypte semble à nouveau retrouver une forme d'unité politique au cours du règne de Psammétique 1^er (664-610 avant J.-C.). C'est alors que débute l'utilisation de la nécropole d'Assouan. Pendant presque un siècle et demi, et avant la mainmise de l'Empire perse achéménide sur le « pays des Deux Terres » (525-404 avant J.-C.), l'Égypte de la XXVI^e dynastie connaît une période de renouveau et de prospérité. Les habitants de Haute et Basse-Égypte s'ouvrent encore davantage au monde, et l'on assiste à l'installation croissante de populations étrangères. En particulier de marchands grecs et de mercenaires. Que ce soit dans le delta, au nord, ou dans le grand sud et la région d'Assouan.

Là, non loin de la première cataracte du Nil, l'île Éléphantine et sa périphérie sont depuis toujours une zone frontalière, au croisement de nombreuses routes que protègent une multitude de forteresses et garnisons militaires. *« L'étude du cimetière d'Assouan est exceptionnelle pour cela. C'est un lieu où ont été inhumées des populations qui selon les époques pouvaient être d'origine nubienne, libyenne, perse et bien d'autres, ce qui n'existe nulle part ailleurs en Égypte »*, poursuit l'archéologue. Recouvert de poussière et sortant de l'obscurité d'une sépulture du III-II^e siècle avant J.-C. baptisée « tombe 26 », Stefano Nava, de l'université de Milan (Italie), tente de compléter ses relevés à la lumière du jour : *« Dans cet hypogée accessible par un escalier menant à 5 mètres de profondeur, nous avons trouvé, dans deux cavités, une quarantaine d'individus d'époque ptolémaïque*

PHOTOS: AKG-IMAGES / PHOTO12.COM

Mille ans d'histoire égyptienne

Règne des « pharaons noirs »
XXV^e dynastie (nubienne)

Psammétique I^er
XXVI^e dynastie

Darius I^er
XXVII^e dynastie
1^re domination perse

Alexandre le Grand
Dynastie ptolémaïque
Rois macédoniens

Cléopâtre VII
Dernière souveraine d'Égypte
Domination romaine et byzantine

- 750 — - 664 — - 525 — - 404 — - 332 — - 30 — 0 — 641

(IVe-IIIe siècles avant J.-C.), et dans un sarcophage creusé dans la roche, quatre momies de la période romaine. » Des découvertes souvent émouvantes. En particulier lorsque des corps d'enfants sont retrouvés. *« Il y avait des parents, des pères, des mères, et leurs enfants. Jusqu'à 12 petits. Tous momifiés,* ajoute Patrizia Piacentini. *Au point que nous nous demandons s'ils sont tous morts au même moment, s'ils n'ont pas été victimes d'une épidémie…* » La pandémie de Covid-19 n'est pas sans jouer sur les hypothèses des anthropologues !
Ces possibles liens familiaux, Maria Pia Abbracchio, de l'université de Milan, aura à cœur de les vérifier dans le cadre de prochaines analyses paléogénétiques. Mais en cette année 2021, elle est venue avec un appareil portable à rayons X, ses radiographies se concentrant surtout sur l'état sanitaire des momies et l'éventuelle présence, sous leurs bandelettes, d'objets funéraires : plaquette gravée, statuette en métal précieux, scarabée en turquoise… À Assouan, les défunts étaient inhumés sous la protection d'une trilogie de divinités locales dites de la première cataracte — Khnoum, le dieu à tête de bélier, Satet (ou Satis), et Anouket — parfois aussi Hâpy (nom du dieu du Nil, à Assouan).

Une nécropole équivalente au Père-Lachaise à fouiller

L'étude de la nécropole ne fait que débuter et les données sont pour l'instant préliminaires. *« Nous fouillons l'équivalent du Père-Lachaise, et il est impossible d'étudier la totalité des tombes. Pour cette raison, il nous faut échantillonner. Notre sélection se concentre sur les sépultures dont l'apparence architecturale semble présenter des différences* », explique Patrizia Piacentini. Ce cimetière monumental constituait dès l'origine la dernière demeure des notables de la région d'Assouan. D'où un pillage régulier au fil des siècles, qui s'est même poursuivi récemment, après la révolution de 2011 et l'instabilité qu'a ensuite connue le pays. *« En compa-*

EIMAWA / UNIVERSITÉ DE MILAN

Cartonnage orné de colliers ousekh et de décors dorés, parure favorite des dieux.

DIASPORA

Une mystérieuse colonie juive au bord du Nil

La communauté de soldats judéens stationnés sur l'île Éléphantine pendant la domination perse a fasciné les érudits dès la fin du XIXe siècle, notamment parce que cette communauté ne semble pas avoir été uniquement monothéiste. En effet, selon les informations livrées par les papyrus d'Éléphantine *(lire l'encadré p. 84)*, si ces habitants vénèrent YHWH, Yahvé, ils honorent aussi d'autres divinités sémitiques à côté, à l'instar des anciens dieux cananéens Ashim-Béthel et Anat-Béthel — présentés comme la parèdre de Yahvé. *« Voici une communauté qui se réclame du judaïsme et qui visiblement n'en suit pas tous les préceptes* », commente Pascal Vernus, directeur d'études émérite de l'École pratique des hautes études (EPHE), à Paris. Autre singularité confirmée par les écrits trouvés sur des tessons de céramique (*ostraca*), les mariages entre Juifs et Égyptiens étaient fort courants à Éléphantine — preuve là aussi qu'une des prescriptions fondamentales de la religion juive, l'interdiction des mariages mixtes, n'était pas respectée. La communauté juive d'Éléphantine disposait de son propre temple. Construit à proximité d'un sanctuaire égyptien dédié au dieu-bélier Khnoum, le grand seigneur d'Éléphantine, celui-ci aurait été détruit à la suite d'une révolte fomentée en 410 avant J.-C. par le clergé égyptien de Khnoum. Une affaire de voisinage qui aurait mal tourné, selon l'historien Pierre Briant, du Collège de France.

rant des images satellites, nous avons constaté des traces d'activités illégales jusqu'en 2015 », précise l'archéologue. Parfois, sur le terrain, des preuves de ces exactions sont rencontrées : des traces de marteaux-piqueurs restent par exemple visibles à l'entrée de certains tombeaux.

« Heureusement, les voleurs abandonnent souvent ce qui ne les intéresse pas. Recherchant de l'or et des bijoux, ils ont tendance à laisser les statuettes en bois, ou encore des tables d'offrande », déclare Alessandro Cavagna, de l'université de Milan. C'est ainsi qu'en tentant d'extraire une momie de son caveau, les voleurs n'ont pas vu tomber dans le sable un collier porteur d'une plaquette en cuivre où était gravé le nom grec du défunt, « Nikostratos ». *« Bien que largement pillée, cette nécropole est unique et nous avons beaucoup d'espoir dans ce que les fouilles à venir pourraient livrer* », assure Patrizia Piacentini. Du fait de la présence de garnisons aux frontières, à l'instar de l'antique forteresse d'Éléphantine, la « tombe 26 » s'est avérée être par exemple celle d'un chef mili-

P. PIACENTINI

« À Assouan, nous faisons parler les morts pour qu'ils nous racontent l'histoire des vivants ! »

Patrizia Piacentini, professeure d'égyptologie à l'université de Milan (Italie), codirectrice de la mission égypto-italienne à l'est d'Assouan

DOCUMENTS

Les papyrus d'Éléphantine, un témoignage unique

C'est à un journaliste et égyptologue du XIXe siècle, Charles Edwin Wilbour (1833-1896), que l'on doit la découverte de la plupart de ces papyrus sur l'île Éléphantine. Des centaines de documents en égyptien hiératique et démotique, grec, latin ou copte, mais aussi et surtout en araméen, la *lingua franca* de l'Empire perse. Toujours en cours d'étude, ils sont conservés pour leur majorité au musée de Brooklyn, à New York (États-Unis), ainsi qu'à Berlin (Allemagne).

« Cette collection de manuscrits peut être divisée en quatre groupes, dont les plus vieux remontent à la fin de l'Ancien Empire, du temps de Pépi II », explique l'égyptologue et philologue Pascal Vernus, directeur d'études émérite de l'École pratique des hautes études (EPHE), à Paris. Et on y trouve de tout : des lettres administratives, des documents juridiques, des comptabilités, etc. Un deuxième groupe est, lui, composé de papyrus d'époque ramesside, soit des documents écrits en écriture hiératique aux alentours de 1140 av. J.-C. (Nouvel Empire). *« Une troisième série semble provenir d'une bibliothèque du temple d'Éléphantine* », poursuit l'expert : avec des traités de magie, de gynécologie — dans l'Antiquité égyptienne, médecine et magie vont ensemble —, d'ophiologie (étude des serpents), et d'autres liés aux sciences sacerdotales. *« Mais le groupe de documents qui a connu la plus grande notoriété parmi les savants concerne les papyrus en araméen* », poursuit le spécialiste. Des documents (archives juridiques, contrats, divorces, etc.) qui témoignent de l'installation dans la forteresse d'Éléphantine, probablement du VIIe siècle au IVe siècle avant J.-C., d'une communauté de soldats originaires de Judée au service des Perses qui avaient conquis l'Égypte (524-404 avant J.-C.) *(lire l'encadré p. 83)*.

AKG IMAGES

Les manuscrits couvrent, sur mille ans, une grande variété de domaines : droit, comptabilité, gynécologie, magie…

taire ! Sur les planches d'un lit en bois de sycomore était écrit en hiéroglyphes ptolémaïques le nom du général Pamerih, un Égyptien commandant les troupes d'Assouan. L'inscription précisait : *« Mon père était chef des armées »*. Signalant par là même l'exercice d'une profession pratiquée de père en fils.

Plus loin, d'autres vestiges ont livré les restes d'un individu à la jambe amputée. Un combattant blessé ? Dans ce Sud égyptien, les militaires et mercenaires grecs ont joué un grand rôle. Mais ils n'étaient pas les seuls. La découverte à la fin du XIXe siècle et au tout début du XXe des célèbres papyrus d'Éléphantine *(lire l'encadré p. 84)* a notamment révélé la présence d'une communauté de mercenaires judéens et de leurs familles pendant la domination perse de l'Égypte (525-404 avant J.-C.).

Une présence que semble attester, dans le cimetière d'Assouan, la récente découverte d'une tombe d'époque perse (VIe siècle avant J.-C.), où en plus de décorations égyptisantes dédiées à Osiris et à la trilogie des divinités locales, figure sur une paroi une inscription en araméen, la *lingua franca* de la communauté juive d'Éléphantine. Actuellement en travaux, son accès n'est malheureusement pas autorisé. *« La tombe 32 lui ressemblant de l'extérieur, nous avons choisi de l'étudier en espérant qu'elle pouvait elle aussi receler d'autres écrits araméens,* raconte l'archéologue italienne. *Mais la sépulture s'est avérée être d'époque ptolémaïque (IVe-IIIe siècles avant J.-C.), une période plus tardive. Nous y avons néanmoins trouvé de nombreuses momies ainsi que des textes fragmentaires écrits en hiéroglyphes.* » Sous le règne des Ptolémées — les souverains macédoniens d'Égypte, dont Cléopâtre VII fut la dernière représentante —, l'administration écrit en grec ainsi qu'en démotique, l'écriture cursive égyptienne, tout en continuant en effet à utiliser les hiéroglyphes.

EIMAWA / UNIVERSITÉ DE MILAN

Cette délicate figure de félin provient d'un ornement en bois de sarcophage.

Atelier d'embaumeur, poteries, vases à libation, amphores pour les offrandes d'huile et de vin, oiseaux Bâ, représentant l'âme des morts, *oushebtis* (les statuettes funéraires d'Anubis), lampes… Dans la nécropole, les découvertes sont incessantes. De même concernant des fragments de masques funéraires et des cartonnages polychromes, les « couvertures de momies » en vogue aux périodes ptolémaïques. Mêlant papyrus ou chiffons de lin à du plâtre, ces plastrons et coiffes qui remplaçaient les lourds cercueils de pierre étaient peints de couleurs éclatantes — bleu, rouge ou blanc —, parfois d'or. Hélas, ils furent brisés par les pilleurs pour accéder aux momies et objets précieux qu'elles recelaient, à l'instar d'une couverture en bois ornée d'une délicate figure de félin.

Le lieu d'inhumation des tout premiers chrétiens d'Égypte

Quotidiennement collectés, les objets exhumés sont ensuite transportés dans les réserves de l'inspectorat du ministère des Antiquités pour y être étudiés. Situées au cœur de la ville, elles jouxtent l'immense cathédrale copte de l'archange Michel, que gardent 24 h sur 24 des policiers égyptiens aux uniformes d'un blanc éclatant.

« Cette nécropole est un lieu exceptionnel, un endroit où se sont croisées de nombreuses populations. Sans doute un cimetière où ont aussi été inhumés, dès le IVe-Ve siècle de notre ère, les tout premiers chrétiens d'Égypte. Des tombes que des expéditions prochaines nous permettront peut-être de découvrir. Grâce aux papyrus d'Éléphantine, on connaissait les habitants de cette cité dans la vie : nous espérons maintenant les découvrir dans leur demeure d'éternité. À Assouan, nous faisons parler les morts pour qu'ils nous racontent l'histoire des vivants ! », conclut l'égyptologue italienne. ■

ÉCHANGES COMMERCIAUX

Assouan, une ville à la position stratégique

Depuis la plus Haute Antiquité pharaonique, Assouan est considéré comme un lieu stratégique en raison de sa position immédiate en aval de la première cataracte, « la grande digue » du Nil. Frontière naturelle de l'Égypte, siège de garnisons militaires, Assouan a été un haut lieu d'échanges privilégiés avec l'Afrique subtropicale. Les Égyptiens en partaient avec des caravanes pour aller rechercher des biens de luxe comme de l'ivoire, des peaux de panthère, mais aussi de l'or, de l'encens et des épices. L'antique nom d'Assouan était Swenet, qui a donné *Souan*, « commerce » en copte. Syène sera son nom grec. Assouan fut aussi, pendant près de 3000 ans, un grand site d'extraction de granit, d'où la présence d'imposantes carrières encore visibles de nos jours.

L'épave de la « Mary-Rose » va-t-elle sombrer à nouveau ?

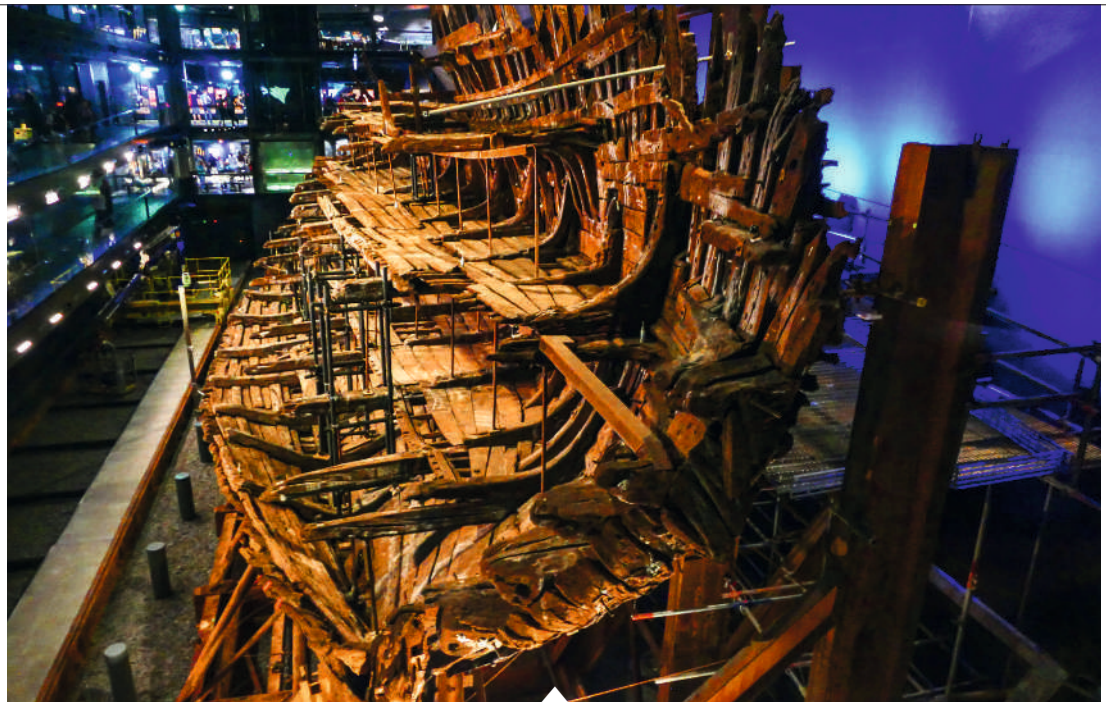
Le joyau de la flotte de la couronne d'Angleterre coulé au XVIe siècle, renfloué en 1982 et exposé à Portsmouth, se détériore malgré les soins qui lui sont apportés. Mais grâce à la tomographie à rayons X, un nouveau traitement pourrait être efficace contre les bactéries qui rongent le navire.

Le 19 juillet 1545, après trente-trois ans de bons et loyaux services, la *Mary-Rose*, caraque de combat de la Royal Navy, sombre face au château de Southsea, dans le bras de la Manche séparant l'Île de Wight du reste de l'Angleterre. Sous les yeux horrifiés d'Henri VIII, qui assiste au désastre depuis la forteresse, elle emporte avec elle près de la totalité de son équipage. Si la raison du naufrage fait aujourd'hui encore débat — le navire a-t-il été coulé par les galères françaises, contre lesquelles il menait la bataille, ou à la suite d'une mauvaise manœuvre de l'équipage ? —, il laissa un souvenir amer au souverain le plus sulfureux des Tudors : la *Mary-Rose* était son bateau favori. Quatre siècles plus tard, en 1982, des experts sortent le bateau de l'eau pour l'exposer dans la ville de Portsmouth. Dans un état de conservation fantastique pour son âge avancé, celle que l'on surnomme la « *Pompéi anglaise* » pour les milliers d'objets du XVIe siècle qu'elle livra, demande néanmoins depuis une attention sans relâche. Ces quarante dernières années, les scientifiques n'ont cessé de lui prodiguer des traitements de conservation, entre aspersion d'eau douce recyclée et applications successives de polyéthylène glycol (PEG), un composé permettant de stabiliser le bois saturé d'eau et d'empêcher son rétrécissement lorsqu'il sèche. Malgré ces précautions, les acides issus de l'oxydation et de la dégradation des espèces chimiques présentes dans le bois continuent de ronger la *Mary-Rose* à petit feu. L'épave la plus célèbre du Royaume-Uni serait-elle donc vouée à une mort inéluctable ?

NPL - DEA PICTURE LIBRARY/BRIDGEMAN IMAGES

Navire de combat engagé dans la guerre contre la France, la « Mary-Rose » était le bateau favori du roi Henri VIII.

En octobre 2021, une équipe pluridisciplinaire, comprenant des historiens, des physiciens ou encore des chimistes des universités de Copenhague (Danemark), Columbia (États-Unis) et de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, à Grenoble), a apporté un nouvel espoir. Elle a mené une analyse approfondie de la coque grâce à l'imagerie multi-résolution par tomographie à rayons X, une technique consistant à diriger sur un échantillon (ici, plusieurs morceaux de l'épave de la taille d'allumettes) un mince faisceau de rayons X de très haute intensité. Une première en matière de patrimoine. Cette approche a permis de découvrir que le bois était truffé de nanoparticules contenant du zinc qui contribuent à sa détérioration. « *Jusqu'à présent, nous ne savions pas précisément la nature et la répartition des espèces chimiques sur l'épave* », indique Simon Billinge, physicien des matériaux à l'université Columbia et



WHA / WORLD HISTORY ARCHIVE / AKG IMAGES

Les chercheurs ont dirigé un faisceau de rayons X de très haute intensité sur la coque de la « Mary-Rose » (ici exposée à Portsmouth, Royaume-Uni) pour obtenir des données. Une première en matière de patrimoine.

coauteur de l'étude. Lors de sa longue immersion, l'épave du navire était disposée de sorte qu'une de ses parties dépassait de la surface du fond marin quand une autre restait enfouie dans la vase. Seulement cette seconde partie est parvenue jusqu'à nous, épargnée des attaques des micro-organismes ayant besoin d'oxygène pour se développer. Mais d'autres bactéries, dites anaérobies, capables d'évoluer dans les milieux pauvres en oxygène, se sont développées. *« Nous avons découvert que ces bactéries laissaient derrière elles des nanoparticules de sulfure de zinc, parfois avec un peu de fer incorporé »*, révèle Simon Billinge. Une donnée capitale pour comprendre les processus qui ont démarré dès l'instant où le bois s'est à nouveau retrouvé au contact de l'oxygène. Grâce à la tomographie, Simon Billinge et les autres membres de l'équipe ont ensuite pu cartographier l'emplacement des colonies de bactéries en fonction de l'endroit où elles ont laissé ces dépôts. *« Cela nous a en quelque sorte permis de créer une minuscule carte des villes bactériennes »*, poursuit le chercheur.

Vers de nouvelles stratégies de conservation

Si le bois est aujourd'hui trop sec pour accueillir une quelconque vie bactérienne xylophage, ces minuscules dépôts de sulfure de zinc, eux, continuent de réagir chimiquement à l'air et à l'humidité ambiante, même contrôlés. *« Les acides attaquent le bois et causent des dommages structurels »*, explique Gavin Vaughan, spécialiste des matériaux à l'ESRF qui a travaillé sur des échantillons du navire au synchrotron de Grenoble. *« Et ce n'est pas tout : nous avons été surpris d'apprendre que le polyéthylène glycol lui-même, supposé jouer le rôle de stabilisateur, commençait à réagir avec le bois. Il se décompose et forme des acides qui menacent à leur tour l'intégrité mécanique de la coque. »* Après les nanoparticules de zinc, voilà donc un nouvel ennemi à ne pas quitter des yeux. *« Maintenant que nous avons compris son état actuel, nous pouvons mettre au point différentes stratégies de conservation »*, assure Eleanor Schofield, chimiste et responsable de la conservation et des collections de la *Mary-Rose*. L'une d'entre elles s'appuierait sur le fait que le fer présent dans de nombreuses particules les rendrait magnétiques : *« On peut imaginer un aimant pour les extraire du bois »*, détaille Gavin Vaughan. Mais il entretient plutôt l'espoir de trouver *« un composé qui stabiliserait le tout »*. Pour que la seconde vie de la *Mary-Rose* soit bien plus longue que la première. ■

Marine Benoit @marin_eben

TIM LEE

« Jusqu'à présent, nous ne savions pas précisément la nature et la répartition des espèces chimiques sur l'épave »

Simon Billinge, physicien des matériaux à l'université Columbia (États-Unis)

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 88

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

Aurel met en scène ses questionnements sur les liens entre l'humain et le singe.

Plongée dans la planète des singes

Le dessinateur Aurel explore le monde des primates. Une BD à la pédagogie assumée où la science n'étouffe jamais le plaisir de lecture.

HOMINOÏDES Ceci n'est pas une BD pour les enfants. Le philosophe Baptiste Morizot le rappelle dans sa préface à *Singes*, en soulignant que son mérite est bien de restituer à l'animalité le statut de sujet pour adultes, et de lui accorder une dimension politique : celle de la reconnaissance de l'altérité. Aurel, dessinateur et auteur attaché aux thématiques sociétales, part ici à la découverte de ces « autres » qui nous renvoient tel un miroir d'énigmatiques ressemblances. Comment appréhender leur singularité ?

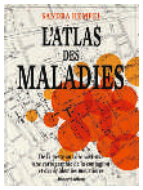
Dans cette histoire scrupuleusement documentée d'un humain ayant abandonné sa vision anthropocentrée pour déchiffrer le comportement et l'évolution des singes, le dessinateur se met savoureusement en scène. Son parcours débute avec un éclairage sur les origines de notre espèce et le mène à demander à la philosophe et éthologue Vinciane Despret, tout sourire derrière le nuage de sa vapoteuse, ce que les primates pourraient nous apprendre : ce qu'elle considère comme une question de mauvais goût ! Les formidables connaissances de grands primatologues prennent corps, ponctuées de pages de « flashs » scientifiques.

Aurel rencontre aussi Frans De Waal au sujet de la morale et de l'empathie chez les chimpanzés et les bonobos, Tetsuro Matsuzawa autour de leurs capacités cognitives, et la spécialiste de l'écologie comportementale des chimpanzés Sabrina Krief, qui lui révèle leur façon de se soigner grâce aux plantes. Des QR codes permettent au lecteur de retrouver les vidéos et les publications citées. Jubilatoire exploration de la planète singe ! ■ **Andreina De Bei**

Singes. Quel genre d'animaux sommes-nous ? Aurel, préface Baptiste Morizot, Futuropolis, 200 p., 25 €

Cartographie de la souffrance

ÉPIDÉMIES Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur les épidémies se trouve dans cet ouvrage rédigé par une journaliste médicale britannique. À l'aide de cartes,



elle montre comment la géographie a joué un rôle clé dans la propagation et l'histoire des maladies, émaillant son récit d'anecdotes et d'iconographies anciennes. Peste, sida, dysenterie, choléra, ou encore Covid-19… L'auteure démontre que derrière chaque fléau, il existe une histoire complexe mêlant à la fois la biologie et la recherche médicale. ■ **H. R.**

L'Atlas des maladies, Sandra Hempel, Robert Laffont, 224 p., 22 €

Une consultation à portée de page

CANCER Gilles Freyer n'élude aucune des questions que se posent les femmes touchées par un cancer du sein. Un livre écrit *« pour exprimer tout ce que je souhaiterais dire à mes patientes lors des consultations »*, résume le directeur de l'Institut de cancérologie des Hospices civils de Lyon. À la clarté des questions-réponses empreintes du vécu du praticien et de ses patientes s'ajoute l'aspect pratique de ce livre téléchargeable avec de nombreuses vidéos explicatives. ■ **H. J.**

Cancer du sein, s'informer pour se soigner, Gilles Freyer, Éditions du Dr Lemoine, 277 p., 9,99 €

Les nouvelles armes numériques

DÉSINFORMATION Avec Internet est arrivée la facilité à communiquer, à échanger, à témoigner, à s'exprimer. À publier n'importe quoi et à harceler aussi. Spécialiste de communication et analyste en stratégie de désinformation,

l'auteur plonge dans une face noire d'Internet. Celle des usages nocifs des outils numériques, véritables armes de guerre pour déstabiliser, nuire, influencer des opinions. Un Internet qui ne sert plus à échanger et à trouver du consensus entre avis divergents mais à soumettre le contradicteur, le dominer. ■ **A. D.**

Agora toxica, la société incivile à l'ère d'Internet, Stéphanie Lamy, éditions du Détour, 224 p., 18,90 €

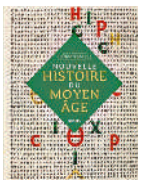
Les maths, discipline physique

EXPÉRIENCE *« Suivre un cours de maths comme on suit un cours d'histoire ou de biologie, c'est aussi absurde que de prendre des notes durant un cours de yoga […]. Si vous ne faites jamais le moindre exercice de respiration, ça ne sert strictement à rien. »* C'est pour en finir avec ce mythe des « bons en maths » que l'auteur, lui-même mathématicien, a écrit ce récit. Selon lui, les « nuls en maths » le sont parce que personne ne leur a dit qu'il n'y avait pas de choses à apprendre, mais des choses à faire. Les maths seraient donc une activité hautement physique. Il évoque notamment René Descartes et son *Discours de la méthode* ou Alexandre Grothendieck et son épaisse autobiographie *Récoltes et Semailles*, qui sont autant de guides d'apprentissage des sciences mais aussi de la vie. David Bessis partage sa vision claire de ce que sont pour lui les mathématiques et de leur accessibilité pour toutes et tous. Passionnant et convaincant. ■ **Philippe Pajot**

Mathematica. Une aventure au cœur de nous-mêmes, David Bessis, Seuil, 320 p., 19,90 €

L'histoire médiévale dépoussiérée

SYNTHÈSE Au cœur de cet ouvrage, l'histoire médiévale du monde latin a été profondément dynamisée depuis deux décennies par les



recherches sur les mondes périphériques — les pays d'Islam, les mondes slaves — mais aussi les travaux menés sur les régions plus lointaines que sont l'Afrique subsaharienne ou l'océan Indien. L'objectif de ce livre collectif : proposer une nouvelle synthèse de l'histoire du Moyen Âge européen, à la lumière des travaux savants les plus récents. ■ **B. A.**

Nouvelle Histoire du Moyen Âge, Florian Mazel (dir.), Seuil, 1056 p., 39 €

Tempêtes en sous-sol

GÉOLOGIE L'Auvergne a l'air paisible aujourd'hui. Mais Il y a 15 000 ans, des gaz se sont accumulés dans le volcan du puy de Dôme et le bouchon a sauté, libérant une énergie terrifiante qui a ravagé les alentours par ses nuées ardentes. Éruptions, tremblements de terre, inondations, météorites, orages violents… L'histoire de la France est marquée par des événements brutaux qui ont laissé de profondes empreintes. Des phénomènes plus lents ont également provoqué d'importantes transformations des roches et des surfaces, soulevant les montagnes, dessinant les continents, ouvrant les océans. C'est à une lecture géologique des paysages que nous invite ici le professeur de SVT Georges Feterman, à l'aide de 200 photos. Une autre façon de visiter notre pays pour y redécouvrir des sites surprenants, peuplés de coulées de lave, de cascades minérales ou de coraux pétrifiés. On espère que ce livre inspirera une application pour smartphone ! ■

Rachel Mulot

Les Forces de la nature en France, Georges Feterman, Delachaux et Niestlé, 240 p, 29,90 €

Sa majesté l'arbre

ÉCOLOGIE Sur l'île de Célèbes, en Indonésie, la tribu Toraja dépose les bébés morts dans le tronc d'un arbre creusé. Le trou est refermé par un filet en fibre de palme. « *Quand l'arbre guérit et que son écorce se referme, le nourrisson est absorbé. Et le cycle de la nature peut reprendre son cours.* » Ce récit extrait de l'ouvrage *Auprès de nos arbres* illustre bien la manière dont les sociétés humaines ont au cours de leur évolution intégré les arbres dans leurs rites, leurs cultures autant que dans leur quotidien. Cette histoire symbolique de l'arbre mêle avec bonheur ethnologie, botanique et beaux-arts. Mais aujourd'hui, des pans entiers de forêts disparaissent chaque jour de la surface de la Terre. Pourtant, en Inde, en Équateur, au Togo ou au Portugal, des communautés se battent pour reconstituer ou défendre « leur » forêt. *Au Nom de l'arbre* donne à voir ces actions de reboisement. ■

Sylvie Rouat

Auprès de nos arbres, Édith Montelle, Benjamin Stassen, Delachaux et Niestlé, 288 p., 39,90 €

Au Nom de l'arbre, sous la direction de Cyril Drouhet, Albin Michel, 224 p., 39 €

La fin des ruines ?

PATRIMOINE Spécialiste de l'Amérique précolombienne, professeur à l'Université libre de Bruxelles, Peter Eeckhout revient dans cet ouvrage émaillé de photographies sur les « plaies » qui mettent en danger le patrimoine mondial. Pillage, urbanisation, tourisme de masse, restaurations abusives, négligence… Il explique, d'Angkor à Carthage en passant par Pompéi, Palmyre ou encore le Machu Picchu, pourquoi tous ces lieux d'exception et de nombreux autres sont gravement menacés. *« Les sites archéologiques sont des ressources non renouvelables… Ils sont uniques et leur nombre est fini.* » ■ **B. A.**

Patrimoine mondial en péril, Peter Eeckhout, éditions Passés/Composés, 320 p., 35 €

Réjouissances cosmiques

SCIENCE-FICTION Le premier tome des nouvelles complètes de Liu Cixin, auteur de la trilogie *Le Problème à trois corps*, vient de paraître. C'est sobrement, avec une pointe d'ironie et une grande maîtrise des sujets scientifiques, que le phénomène de la SF chinoise sonde les mystères de l'Univers et de l'âme. Qu'ils se frottent à la théorie du chaos ou se projettent dans un futur où les océans seront asséchés et les vacances sur Terre un luxe, les humains se cognent tôt ou tard à leurs tourments existentiels. ■ **A. De B.**

L'Équateur d'Einstein, Liu Cixin, Actes Sud, 592 p., 24,80 €

Paré au décollage !

AÉRONEFS Comment un avion peut-il décoller, changer de direction et atterrir ? À quoi sert une hélice ? Quelles forces sont à l'œuvre pendant le vol ? Illustré par des dessins rétro et minutieux, l'ouvrage explique pas à pas tous les composants des aéronefs et décrit avec beaucoup de clarté la physique du vol. Une première partie est consacrée à la conception des appareils, une autre à l'influence des conditions météorologiques, une troisième à la communication aérienne. Une quatrième, enfin, à l'avenir du domaine. Une douzaine d'avions de légende sont également présentés. ■ **F. D.**

Le Livre des avions : de leur conception à leur envol, Jan Van Der Veken, Milan, 104 p., 20,90 €

Le grand voyage

ORNITHOLOGIE La migration chez les oiseaux n'est étudiée que depuis la fin du XIXe siècle, lorsque l'ornithologue danois Hans Mortensen commença à utiliser de petites bagues métalliques pour identifier des étourneaux sansonnets. Aujourd'hui, les chercheurs disposent de géolocalisateurs de moins d'un gramme. C'est ainsi qu'ils ont pu découvrir les routes empruntées par les différentes espèces d'oiseaux migrateurs et leurs évolutions à l'heure du changement climatique. Dans ce livre richement illustré et scandé de cartes pédagogiques, Marc Duquet fait l'état des lieux d'un phénomène que l'on retrouve sur tous les continents. ■ **S. R.**

Migrations, Marc Duquet, Delachaux et Niestlé, 192 p., 29,90 €

Randonnée humaniste

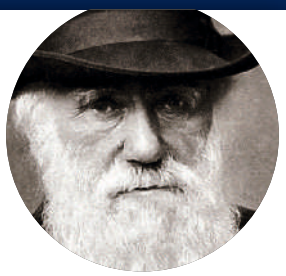
BD À plusieurs milliers d'années d'intervalle, deux groupes d'*Homo sapiens* ont enfoui sous terre des traces de leur passage. Dans la grotte du Pech Merle (Lot), ils ont représenté durant le paléolithique des mammouths, des antilopes par des traits de fusain vifs et aériens. Et l'auteur se met en marche à partir de là vers le nord-est avec comme projet de relier ce lieu avec un plus récent, à 800 km de là : Bure (Meuse). Ici, si des êtres humains sont descendus dans les profondeurs, c'est pour un tout autre projet : enfouir les déchets nucléaires issus de leurs polluantes activités. Chemin faisant sur les sentiers de France, l'auteur y rencontre quantité de témoins, archéologues, géologues, ingénieurs, activistes pour comprendre ce *« vertige »*, comme il le définit. Sa randonnée est fascinante car elle permet de mettre en résonance deux actes très différents et qui pourtant en disent long sur les relations que nous entretenons avec notre planète et avec son sol. ■ **Hervé Ratel**

Le Droit du sol. Journal d'un vertige, Étienne Davodeau, Futuropolis, 212 p, 25 €

LES INDISPENSABLES

LES INDISPENSABLES

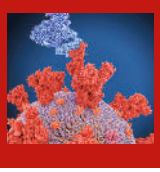
SCIENCES ET AVENIR



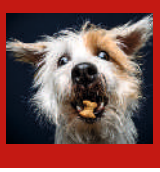
Comment Darwin a révolutionné notre vision du vivant
p. 29

LES GRANDES ÉNIGMES DE L'ÉVOLUTION

Quelle est l'utilité du plaisir… et de l'orgasme ? p. 63



Une médecine évolutionniste pour vaincre les virus ? p. 46



À quoi ressembleront les espèces de demain ? p. 74

JULIA MARGARET CAMERON DOMAINE PUBLIC ; SPL ; JUAN GARTNER/SPL/SUCRE SALÉ ; GETTY

en vente en kiosque

Alise-Sainte-Reine (21)

MuséoParc Alésia
Le site de la bataille d'Alésia rouvrira ses portes le 15 février. Le visiteur pourra retrouver les trois espaces : le centre d'interprétation, consacré au siège de l'*oppidum*, mais aussi les vestiges gallo-romains de la ville d'Alésia et la statue de Vercingétorix érigée en 1865 à la fin des recherches archéologiques menées sur place.
1, route des Trois-Ormeaux. Rens. : 03.80.96.96.2.

Le Bourget (93)

Vers la Lune et au-delà
Il a fallu 1200 heures pour assembler 180 000 briques de Lego représentant les moments clefs de l'aérospatiale et de la conquête de la Lune. On y retrouve aussi la fusée Saturn V des missions Apollo, un astronaute en taille réelle ou encore le Concorde.

Musée de l'Air et de l'Espace, aéroport de Paris-Le Bourget, 3, esplanade de l'Air et de l'Espace, jusqu'au 29 mai. Rens. : 01.49.92.70.00.

Le Havre (76)

Il y a 150 millions d'années… et des poussières
Avec cette exposition, le muséum d'Histoire naturelle retrace l'histoire de l'évolution uniquement à partir de ses collections de paléontologie, détruites durant la Seconde Guerre mondiale puis reconstituées au fil du temps. Elles comprennent aujourd'hui des fossiles uniques au monde.
Muséum d'Histoire naturelle, place du Vieux-Marché, jusqu'au 23 mars. Rens. : 02.35.41.37.28.

Paris (75)

Juifs d'Orient, une histoire plurimillénaire
Cette exposition clôture une trilogie consacrée aux religions monothéistes. En 280 pièces, elle raconte une histoire allant des tribus juives de la péninsule Arabique à l'essor des centres urbains juifs au Maghreb. Le parcours se termine avec le tournant du XXe siècle, les colonisations et la fin de l'Empire ottoman. (Lire notre reportage : sciav.fr/900juifs)
Institut du monde arabe, 1, rue des Fossés-Saint-Bernard, jusqu'au 13 mars. Rens. : 01.40.51.38.38.

Le chantier de Notre-Dame de Paris en bande dessinée
Cinq dessinateurs proposent une immersion dans la cathédrale en travaux. Adjim Danngar représente les opérations de sécurisation, François Schuiten est avec les cordistes, Sandrine Martin documente l'organisation de tout le chantier, Zeina Abirached se consacre au démontage de l'échafaudage de la flèche et Mathieu Sapin met en abyme la venue des dessinateurs.
6, parvis Notre-Dame-place Jean-Paul II.

Banquet
Science et gastronomie. C'est le thème de cette exposition où l'art de la table convoque l'expérience des cinq sens, la sociologie et l'anthropologie. Composée de trois espaces, elle raconte le geste culinaire mais aussi les chemins cognitifs liés au goût, avant de se conclure par une zone immersive conçue avec le chef Thierry Marx.
Cité des sciences, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 7 août. Rens. : 01.85.53.99.74.

Vaulx-en-Velin (69)

Vaisseau Terre
Pendant un an, le Planétarium dit tout sur la planète Terre. On la découvre depuis l'espace, on explore ses zones habitables, on comprend comment la vie a pu y apparaître. Des vues satellitaires révèlent l'empreinte humaine et, au terme du parcours, le réchauffement climatique comme la montée des océans soulèvent la question de l'avenir du vivant.
Planétarium, place de la Nation, jusqu'au 2 janvier 2023. Rens. : 04.78.79.50.13.

Versailles (78)

Louis XV à l'honneur
Monarque méconnu, Louis XV est mis en valeur cette année au château de Versailles, pour les 300 ans de son couronnement. L'exposition évoque son règne et s'ouvre sur un chef-d'œuvre scientifique de l'époque : la pendule astronomique de Claude-Siméon Passemant (1702-1769), qui nécessita 36 ans de travail.
Château de Versailles, place d'Armes, jusqu'au 19 février 2023. Rens. : 01.30.83.78.00.

Chamonix (74) / Exposition

Le musée des Cristaux

COLLECTION MUSEE DES CRISTAUX, CHAMONIX-MONT-BLANC, LEG J.OUTY

Le musée des Cristaux de Chamonix a réouvert ses portes le 17 décembre dernier enrichi de legs exceptionnels de pièces provenant du monde entier. La collection est devenue la première de France avec 1500 quartz. Mais l'origine du fonds est avant tout locale. Le Mont-Blanc est en effet le terrain de jeu des cristalliers — chasseurs de cristaux naturels — à la recherche des fluorines et des quartz fumés qui font la réputation du massif. Une trentaine de cristalliers continuent d'arpenter la montagne à la recherche de ces pierres exceptionnelles qui servaient autrefois de pampilles de lustres. Aux 300 spécimens locaux s'ajoutent désormais le legs de 1255 pièces collectionnées par Michel Jouty, un bijoutier chamoniard. Vanadinite, aigue-marine, béryls bleu ou vert… Le musée situé dans l'espace Tairraz recèle des splendeurs dont l'origine est expliquée par des animations pédagogiques. ■ **Loïc Chauveau**

Musée des Cristaux, parvis du parking Saint-Michel, 615, allée du Recteur-Payot. Rens. : 04.50.54.78.39.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

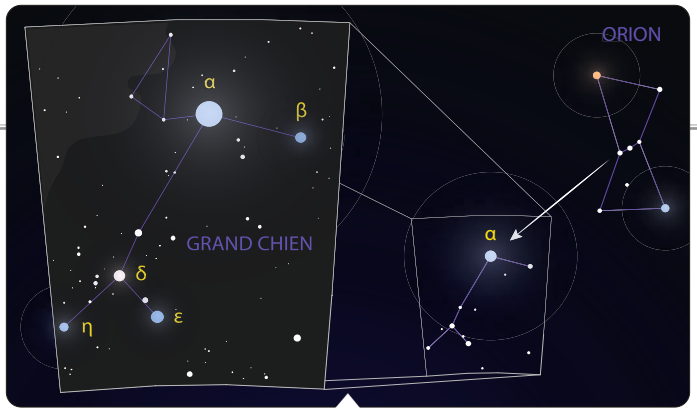
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (26°) à l'ouest du Soleil le 16. Elle est visible au petit matin. Malheureusement, sa hauteur demeure médiocre sous nos latitudes.

VÉNUS L'étoile du Berger, très brillante, est facilement accessible vers le sud-est en fin de nuit, à une bonne dizaine de degrés de hauteur. Elle se lève tout le mois environ 2h15 avant le Soleil.

MARS La planète Rouge est observable en fin de nuit et au petit matin vers le levant. Il est recommandé d'utiliser Vénus, dont elle est à moins de 10° en février, pour faciliter son repérage. Mars traverse actuellement la constellation du Sagittaire.



Aisément reconnaissable, Orion nous permet de localiser Sirius (α) sans équivoque. β porte le nom de Mirzam, δ celui de Wezen, ε est Adhara et η Aludra.

Sirius, belle d'hiver

ASTRE PRINCIPAL DE LA CONSTELLATION DU GRAND CHIEN, Sirius (α) est, de loin, l'étoile la plus étincelante du ciel nocturne. La raison de son éclat intense réside à la fois dans sa luminosité importante — 25 fois celle du Soleil — et dans sa proximité (8,7 années-lumière). Si on plaçait le Soleil à une telle distance, il brillerait comme Mirzam (β).

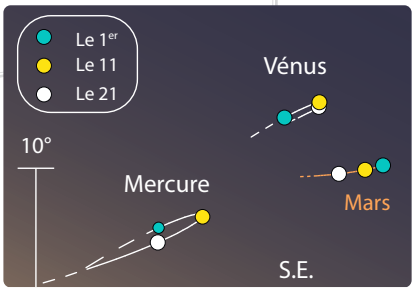
Notre conseil Localisez Orion, la constellation la plus remarquable du ciel d'hiver, qui trône plein sud vers 21h. Prolongez ensuite vers l'est les trois étoiles formant sa ceinture : voilà Sirius !

JUPITER La reine des planètes est encore visible en début de mois vers le couchant mais disparaît ensuite, se noyant dans les lumières du crépuscule. Elle sera en conjonction avec le Soleil le 5 mars. Son retour dans le ciel matinal est prévu pour avril.

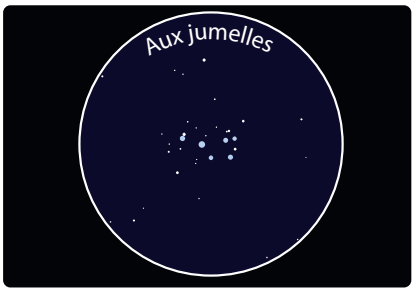
SATURNE La planète aux anneaux passe en conjonction avec le Soleil le 4. Elle n'est pas observable ce mois. Nous la retrouverons timidement en mars, dans les lueurs de l'aube.

L'appli du mois

NASA - ASTRONOMY PICTURE OF THE DAY (APOD) est une application gratuite en anglais pour les appareils sous Android. Elle permet d'afficher les photographies et les vidéos du service « Image astronomique du jour » de la Nasa depuis 1995, accompagnées d'un court texte explicatif.



LE CIEL DU MATIN EST RICHE EN PLANÈTES ET TROIS D'ENTRE ELLES sont observables ce mois : Vénus, Mars et Mercure, dont les positions sont indiquées les 1er, 11 et 21.



FACILE À SITUER TOUT CE MOIS CAR HAUT DANS LE CIEL DE DÉBUT DE NUIT, l'amas d'étoiles des Pléiades resplendit à l'œil nu et encore plus à travers une paire de jumelles.

LE MATIN DU 27, 45 MINUTES AVANT LE LEVER DU SOLEIL, un fin croissant de Lune rendra visite aux planètes Mars et Vénus dans le Sagittaire, très bas vers le levant.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de février

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Ne pas faire dire au Giec ce qu'il ne dit pas !

Le Giec soutient tel choix… Le Giec préconise… Sur les réseaux sociaux, les chaînes d'infos, dans la bouche de certains politiques, acteurs économiques, activistes, etc., le Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (Giec) apparaît comme une instance très prescriptive. À tort, car sa seule mission est d'évaluer les informations scientifiques, techniques et socio-économiques pour comprendre le fonctionnement du climat, les risques liés au changement climatique et les options d'action (adaptation, atténuation des émissions de gaz à effet de serre).
Le Giec ne fait pas de recherche mais fournit une analyse critique de l'état des connaissances sur le changement climatique et ses enjeux sociétaux, de manière exhaustive, rigoureuse et transparente. Ses évaluations sont traçables dans la littérature scientifique et exprimées en langage calibré *via* des niveaux de confiance pour rendre compte de la maturité des connaissances et de la robustesse ou du niveau d'incertitude des conclusions.
Le Giec n'est donc pas pour ou contre le nucléaire, ni pour ou contre les énergies renouvelables, etc. Il synthétise la littérature scientifique qui traite des trajectoires de transition énergétique, évalue les avantages et les inconvénients des différentes options dans le cadre des objectifs de développement durable. Les choix reviennent au politique, et doivent être assumés par les décideurs dans un contexte participatif, délibératif et démocratique, cadre ô combien nécessaire à rappeler aujourd'hui. ■

CLAIRE MATHIEU

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université de Paris)

MATHÉMATIQUES PAR CLAIRE MATHIEU

Symétrie ou réflexivité ?

Le concours Miss France 2022 contenait la question suivante : *« Si 1 est égal à 5, 2 est égal à 25, 3 à 605, 4 à 10 855, alors 5 est égal à quoi ? »* Les réponses possibles sont : 5 est égal à 1, à 2, à 5, ou à 25. Normalement, 1 n'est pas égal à 5, donc pour répondre, il est nécessaire d'interpréter. Peut-être faut-il trouver l'élément suivant d'une suite qui commence par 5, 25, 605, 10 855 ? Non, car cette suite n'existe pas dans l'encyclopédie en ligne des suites de nombres entiers.
Peut-être l'égalité est-elle utilisée dans le sens usuel, mais chaque nombre est-il en fait un simple symbole ? Ainsi : *« si a est égal à b, c est égal à d, e est égal à f, g est égal à h, b est égal à quoi ? »* avec pour les réponses : b est égal à a, à c, à b, ou à d. La première réponse proposée convient. C'est le verdict populaire : *« 5 est égal à 1 puisque 1 est égal à 5, il suffit de lire l'énoncé ! »* Cette réaction montre une capacité implicite d'abstraction, puisque le lecteur aura su remplacer les nombres par des symboles.
Mais la difficulté qui surgit alors est qu'une autre réponse est cohérente : 5 est égal à 5. Choisir la première, c'est rejeter la troisième, et choisir la troisième, c'est rejeter la première. L'égalité dont parle l'énoncé n'est donc pas celle que nous connaissons par ses propriétés fondamentales de relation d'équivalence : réflexivité, symétrie, transitivité.
Cette difficulté ne trouble pas la foule, ce qui suggère que la symétrie est une propriété plus fondamentale que la réflexivité. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

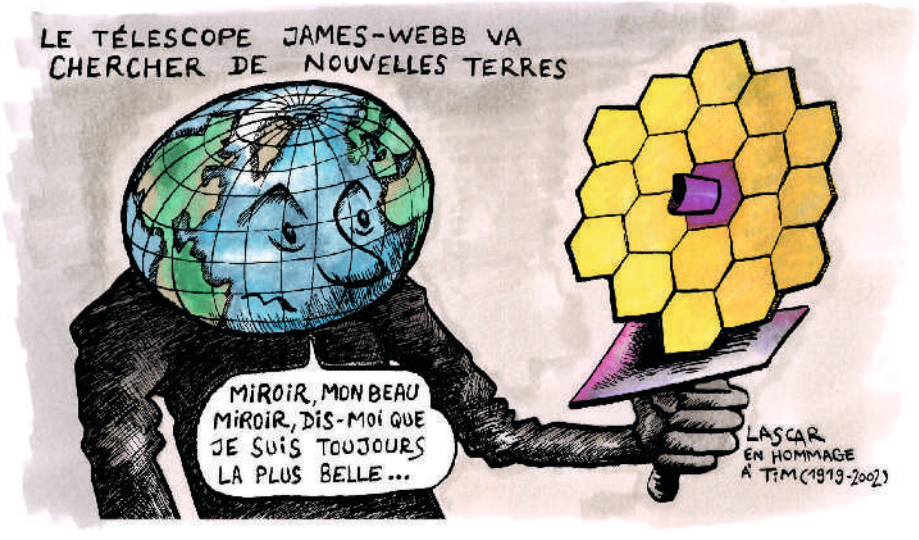
Harmonie sociale ou autonomie individuelle : que choisir ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Le Seuil, 2017.

BRUNO LÉVY

Depuis le siècle des Lumières, les éthiques occidentales reposent principalement sur l'affirmation de l'individu, de son autonomie et de sa liberté : est bon tout ce qui contribue à son épanouissement. À l'opposé, en Chine, en Corée ou au Japon, partout où l'influence de doctrines d'inspiration confucéenne subsiste, l'éthique invoque l'idée d'harmonie : est préférable ce qui donne à chacun sa place naturelle et contribue à l'équilibre de la société. Les droits humains qui s'attachent à la personne, par exemple le droit de circuler, le droit à une personnalité juridique, le droit à la liberté, en particulier à la liberté d'expression, nous paraissent non seulement évidents mais indispensables. Au nom de cette défense de l'individu et de son inaliénable singularité, on encourage ses manifestations les plus extrêmes. Frances Haugen, une ancienne employée de la société Facebook, a révélé en octobre 2021 que ce réseau social attribue un score aux messages à partir de cinq réactions types des utilisateurs : l'amour, l'étonnement, l'enthousiasme, la tristesse et la colère, en privilégiant massivement cette dernière. Ainsi, les nouvelles révoltantes, du fait même de leur caractère révoltant et de l'exaspération qu'elles provoquent, reçoivent un poids plus fort, ce qui favorise leur dissémination.

Une éthique centrée sur l'individu ne peut qu'encourager toutes les formes d'expression, surtout les plus excessives ; elle éprouvera donc des difficultés à condamner les réactions outrancières et ce qui concourt à leur divulgation. En revanche, les éthiques orientales les proscriront avec vigueur, car elles font dissonance. Nous serions donc tentés de nous inspirer de ces dernières, et du principe d'harmonie qu'elles promeuvent, pour réguler le monde numérique. Sauf que ce principe tend à maintenir chacun à la place qui lui a été assignée d'avance et, en conséquence, à reconduire les inégalités en empêchant toute mobilité sociale. Il reste donc à établir un bon équilibre entre promotion de l'autonomie individuelle et harmonie sociale… ■



L'ŒIL DE LASCAR

Il est parti ! Le jour de Noël, le télescope spatial James-Webb s'est finalement arraché à la Terre à bord d'une fusée Ariane V. Que d'émotions après 30 années de développement, qui ont vu le concours de plusieurs milliers d'intervenants et d'un budget de 10 milliards de dollars ! Si c'est à 13 h 48, heure de Paris, que le « télescope du siècle » s'est séparé des derniers éléments de la fusée, le voyage scientifique, évidemment, ne fait que commencer. On attend du successeur d'Hubble qu'il puisse analyser avec précision, grâce à sa détection des infrarouges, l'atmosphère de nouvelles exoplanètes. Et peut-être ainsi identifier des traces de vie extraterrestre. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIQUE

D'où vient la forme des flocons de neige ?

Georg F.

Les flocons sont des objets fractals : ils ont des motifs similaires quelle que soit l'échelle d'observation. Pour le comprendre, il faut rappeler le processus de leur formation. Entre -5 °C et -40 °C, la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère commence à se solidifier. La glace adopte une forme hexagonale : la base du cristal est un prisme à six faces. Ensuite, celui-ci va se développer, donnant naissance à des aiguilles, des étoiles ou des dendrites. En tombant, ces cristaux fondent légèrement et s'agglutinent pour donner les flocons de neige. Avec 10^{18} molécules d'eau, le nombre d'arrangements possibles est immense et chaque flocon est probablement unique. ■ **A.-S. T.**

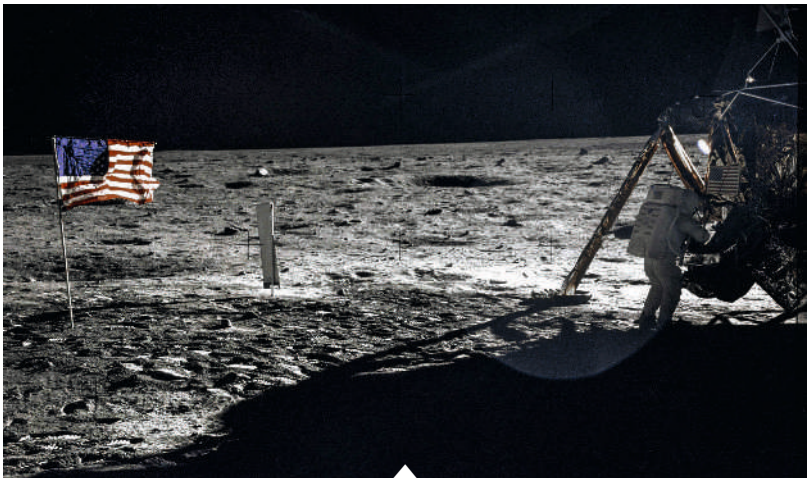
@TassartAS

ASTRONOMIE

Le Soleil fait-il du bruit ?

Christophe de S.

« *Le Soleil n'est pas silencieux. Le bourdonnement bas et palpitant du rythme cardiaque de notre étoile permet aux scientifiques de regarder à l'intérieur, révélant d'énormes rivières de matière solaire qui coulent* », répondait la Nasa en 2018. Ces bruits ont été captés par l'Agence spatiale européenne et l'observatoire solaire et héliosphérique de la Nasa, et rendus audibles par le Stanford Experimental Physics Lab (États-Unis). De ces sons, les chercheurs peuvent déduire des informations sur son activité : les éruptions solaires mais aussi les éjections de masse coronale, où des particules sont projetées à très grande vitesse dans l'espace depuis la couronne solaire. ■ **A.-S. T.**



SIPA

Le drapeau américain posé sur la Lune en 1969 n'est pas un acte de propriété.

ESPACE

À qui appartient la Lune ?

Didier L.

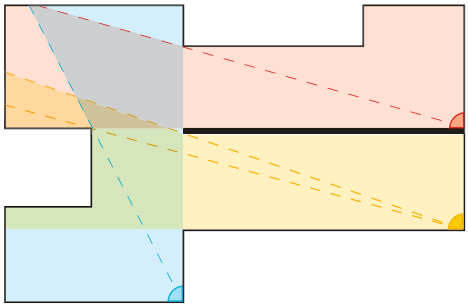
Suffit-il de planter un drapeau sur une terre inexplorée pour s'en déclarer propriétaire ? La question s'est posée pour la Lune dans les années 1960, alors que les États-Unis et l'Union soviétique se mesuraient dans la course à l'espace. Une première réponse a été apportée dès le 27 janvier 1967 avec le traité de l'Espace, sous l'égide des Nations unies. Cet accord international a notamment interdit toute « *appropriation nationale par proclamation de souveraineté, ni par voie d'utilisation, ni par aucun autre moyen* » pour tous les « espaces extra-atmosphériques ». Ainsi, lorsque le drapeau américain a été planté le 21 juillet 1969 sur la Lune, cela n'a induit aucun droit de propriété pour les États-Unis. Si personne ne peut revendiquer la propriété de notre satellite naturel, qui peut en exploiter les ressources, comme son eau ou son hélium ? Cette autre question devait être tranchée dix ans plus tard, sous la responsabilité du secrétaire général des Nations unies, avec le traité sur la Lune, qui prône la nécessité d'un régime international pour son exploitation. Problème : même s'il est entré en vigueur en 1984, les plus grandes nations spatiales — les États-Unis, la Russie, la Chine… — ne l'ont pas ratifié. En 2020, les Américains, au travers de la Nasa, ont proposé les accords Artemis pour encadrer les futures missions. Ceux-ci stipulent notamment que les exploitations devront se faire au bénéfice de l'humanité et en informant les Nations unies. Ils comptent 13 pays signataires, mais pas la Russie ni la Chine. Or, ces deux puissances se sont alliées pour construire ensemble une base lunaire. Dans un flou juridique complet. ■

Léa Fournasson @FournassonL

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 899, Janvier 2022

Caméras casées

Trois caméras bien situées suffisent pour couvrir la bijouterie (les pointillés délimitent les angles morts de chacune).



Reliefs chiffrés

7	2	4	5	3	8	1	6
8	1	6	3	7	5	4	2
6	7	5	1	4	2	8	3
4	3	8	2	1	6	7	5
5	4	2	7	8	3	6	1
3	6	1	8	5	7	2	4
1	5	7	6	2	4	3	8
2	8	3	4	6	1	5	7

Logique de style

Lues de la fin vers le début, les lettres rouges forment la phrase « vous avez gagné », sauf qu'il manque une lettre : il faudrait rougir le « e » de Lazare.

LE VARAN, SEUL SAURIEN QUI SE RÉSUMERAIT

... est l'anagramme de « Sans la musique, la vie serait une erreur », de Friedrich Nietzsche.

Dites l'an avec des 13

Huit 13 suffisent pour calculer la nouvelle année :
(13x13-13/(13+13)) x (13-13/13) = 2022.

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 891
Découvrir les confins de l'Univers

N° 892
Vaccins contre le cancer

N° 893/894
100 trésors scientifiques

N° 895
Explorer l'espace

N° 896
Les super pouvoirs du cerveau

N° 897
Tempêtes, chaleur extrême, inondations

N° 898
Découverte d'un continent englouti

N° 899
Les 10 découvertes de l'année 2021

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 891 ❑ N° 892 ❑ N° 893/894 ❑ N° 895
❑ N° 896 ❑ N° 897 ❑ N° 898 ❑ N° 899

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

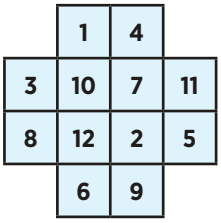
PAR PIERRE BERLOQUIN

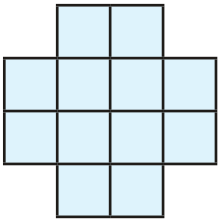
Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Un parterre de nombres

La figure de gauche montre une répartition des nombres de 1 à 12 où aucun n'est consécutif de son voisin, horizontalement, verticalement ou en diagonale et où 12 ne touche pas 1. Saurez-vous répartir à droite les mêmes chiffres, dans une disposition qui ne vient de la première ni par symétrie ni par rotation ?





Logique de suite

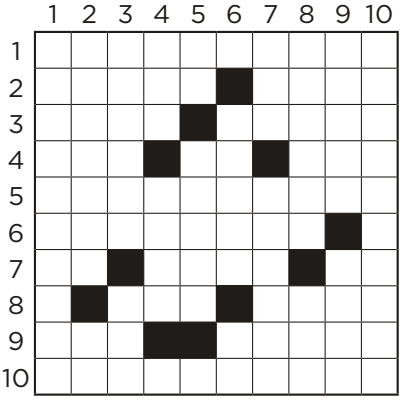
Saurez-vous trouver une logique pour expliquer pourquoi les nombres
1 4 18 96 600 ...
se suivent et proposer le nombre suivant dans la même série ?

Chocolat et citronnade

À résoudre de tête ? Alain échange avec Baudoin 3 kg 1/2 de chocolat contre 8 litres et 2/5 de citronnade. Combien Alain a-t-il eu de citronnade pour 1 kg de chocolat et combien Baudoin a-t-il eu de chocolat pour 1 litre de citronnade ?

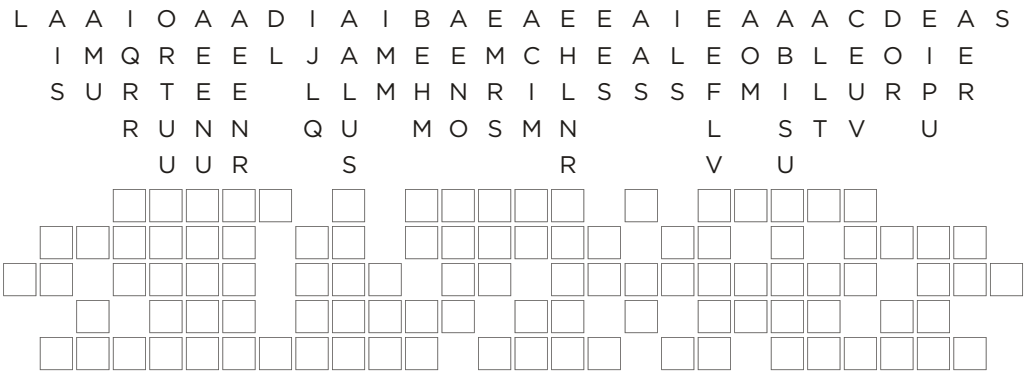
Mots croisés au labo

Horizontal - **1** Constituant de l'antimatière. **2**. Ingénieur électricien d'origine serbe - Crié comme un bébé. **3** Supprimes brutalement - Parent de l'amertume. **4** Élements de retraite - Permet de revenir au point de départ - Élément architectural. **5** Sels d'un acide dont le nom fait frémir. **6** Est contemporain. **7** On les trouve aussi bien dans le neutron que dans le proton - Un problème l'est souvent. - Départ pour Berkeley. **8** Peut être majeur ou mineur - Haut lieu de la recherche. **9** Un des effets de l'Asie - La théorie quantique lui doit beaucoup. **10** Molécule importante de la biochimie.
Vertical - **1** Universelle ou pas, elle se fait sentir. **2** Il est vraiment au centre de la matière - Vient de boire. **3** Bestiole qui a fait des ravages en Afrique - Agitation non contrôlée. **4** Personnel - Peut aussi être universelle. **5** Symbole qui se rattache à l'inventeur de la machine à calculer - Il a quelque chose de négatif. **6** Prénom africain - Note. **7** Voisine avec le listel - Tacite mais confuse. **8** Frappe doucement - Colère remontée. **9** N'est pas forcément nucléaire - Devant Pitt ou Mehldau. **10** Rayonnement en général peu dangereux.



Goutte-lettre

Retrouvez une phrase de Guillaume Apollinaire en faisant tomber chaque lettre verticalement dans une case.



Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Chez votre marchand de journaux et chez votre libraire

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Des factures d'énergie divisées par 2

Travaux pris en charge jusqu'à 90 %*

Travaux, aides, conseils, Hellio réalise tous vos projets de rénovation

« Notre constat est simple : nous avons gagné en confort de vie »

Benjamin et Alexandra
Bénéficiaires d'une rénovation globale

Demandez votre visite technique
100 % gratuite et sans engagement sur

particulier.hellio.com

Ou appelez le **01 87 66 61 93**

*grâce aux aides de l'État déduites sur le devis

Votre énergie a de l'impact

hellio